



UNIVERSIDAD DE CUENCA

Facultad de Ciencias Químicas

Escuela de Ingeniería Ambiental

**Evaluación del comportamiento hidrológico de la cuenca del río Tomebamba a
través del análisis de hidrogramas**

Trabajo de titulación previo a la obtención
del título de Ingeniera Ambiental

Modalidad: Proyecto de investigación

Autora:

Johanna Maricela Reyes Pesántez **C.I.** 0105860332

Email: johannareyes9@hotmail.com

Director:

Ing. Rolando Enrique Céleri Alvear, PhD

C.I. 0602794406

Cuenca – Ecuador

10-enero-2020



RESUMEN

Los ecosistemas de alta montaña cumplen un papel muy importante por su capacidad de regulación y abastecimiento de agua. Por ello es imprescindible estudiar los procesos hidrológicos que ocurren en estos ecosistemas. Sin embargo, en el país no existen estudios sobre el comportamiento interno de una cuenca andina frente a eventos de inundaciones, a partir de un monitoreo distribuido de caudales en varios puntos dentro de la misma cuenca.

En la presente investigación se realizó un análisis del comportamiento hidrológico de la cuenca del río Tomebamba a lo largo de la gradiente altitudinal, usando índices hidrológicos que permiten describir su comportamiento y reacción frente a eventos de inundación. Por otra parte, se determinaron eventos que hayan causado inundación, aplicándose indicadores de reactividad con el propósito de comparar la respuesta hidrológica que tiene cada microcuenca frente a eventos de caudal alto.

Los resultados demostraron una mayor regulación hidrológica en la parte alta de la cuenca de estudio, justificando la importancia de conservar la zona de páramo. Por el contrario, en la zona baja se evidenció mayor reactividad frente a eventos de precipitación. Por último se determinó que el tiempo de propagación de un evento de inundación a lo largo de la gradiente es de dos a tres horas. Sin embargo, en algunos casos existen crecidas fuertes que no son presenciadas en la parte alta de la cuenca y se observan desde la parte medio – baja, el cual se corrobora con estudios de variabilidad espacial de la lluvia.

Palabras clave: Tomebamba. Cuencas de alta montaña. Indicadores hidrológicos. Caudales. Regulación hidrológica. Reactividad.

ABSTRACT

High mountain ecosystems play a very important role due to their capacity of regulation and water supply to some cities of Ecuador. Therefore, it is essential to study hydrological processes that occur in these ecosystems. However, in Ecuador there are currently no studies that address the internal behavior of an Andean basin during flooding events, based on a distributed monitoring of water flows, at various points within the same basin.

In this investigation, an analysis of the hydrological behavior of the Tomebamba River basin along the altitudinal gradient was performed, using hydrological indexes that describe the basin's behavior and reaction in flooding events. The hydrological regulation analysis was carried out through flow duration curves, base flow indexes, and persistence of high and low flows. Additionally, events that cause flooding were determined, applying reactivity indicators, in order to compare the hydrological response that each microbasin has against high water flow events.

Results demonstrated greater hydrological regulation in the upper region of the basin considered in this study, justifying the importance of paramo ecosystem conservation. On the contrary, in the lower zone greater reactivity against precipitation events was evidenced, due to the negative effect of different anthropic activities. Finally, it was determined that the propagation time of a flooding event along the gradient is two to three hours. However, in some cases there are strong swellings that are not present in the upper region of the basin, but are observed in the middle to lower zone, which is corroborated with rainfall spatial variability studies.

Keywords: Tomebamba. High mountain basins. Hydrological indicators. Flows. Regulation. Reactivity.



ÍNDICE DE CONTENIDO

RESUMEN.....	2
ABSTRACT	3
CLÁUSULA DE LICENCIA Y AUTORIZACIÓN PARA PUBLICACIÓN EN EL REPOSITORIO INSTITUCIONAL	7
CLÁUSULA DE PROPIEDAD INTELECTUAL	8
DEDICATORIA	9
AGRADECIMIENTOS	10
1. INTRODUCCIÓN.....	11
1.1 Objetivos.....	14
2. MATERIALES Y MÉTODOS	15
2.1 Zona de Estudio.....	15
2.2 Datos	17
2.2.1 Red de monitoreo de caudal	17
2.2.2 Selección de estaciones y periodo de análisis.....	18
2.2.3 Procesamiento de la información	19
2.3 Análisis de la dinámica hidrológica de la cuenca	20
2.3.1. Análisis de todo el periodo de estudio.....	20
2.3.2 Análisis por periodos.....	24
2.4 Análisis de eventos extremos.....	26
3. RESULTADOS, INTERPRETACIÓN Y DISCUSIÓN	27
3.1 Análisis de la dinámica hidrológica de la cuenca	27
3.1.1. Análisis para todo el periodo de estudio.....	27
3.1.2 Análisis por periodos.....	36
3.4 Análisis de eventos extremos.....	45
4. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.....	50
4.1 Investigaciones futuras	52
5. REFERENCIAS.....	52
6. ANEXOS	59



ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1 Puntos de muestreo para el estudio en el transecto Patoquinoas – Matadero en Sayausí.....	17
Tabla 2 Descripción de los puntos de monitoreo y disponibilidad de información durante el período 2014 - 2018.	19
Tabla 3 Indicadores de reactividad, para analizar los hidrogramas.	25
Tabla 4 Pendientes de la curva de duración de caudales.....	29
Tabla 5 Caudales específicos asociados a varios porcentajes de excedencia.	31
Tabla 6 Comparación de la persistencia de caudales entre microcuencas mediante los indicadores: Máximo y promedio de número de días continuos en el que el caudal permanece bajo o sobre los umbrales.....	32
Tabla 7 Frecuencia y tiempo de eventos en el que persiste el flujo alto	33
Tabla 8 Separación de flujo (constante de recesión) e índice de flujo base.....	34
Tabla 9 Índice de flujo de inundación	36
Tabla 10 Indicadores para el periodo húmedo.....	37
Tabla 11 Indicadores para el periodo seco.....	38
Tabla 12 Indicadores de reactividad para Patoquinoas y Virgen del Cajas.....	41
Tabla 13 Indicadores de reactividad para Virgen del Cajas y Piscícola Chirimachay...42	
Tabla 14 Indicadores de reactividad para las microcuencas Piscícola Chirimachay y Matadero Puente.....	43
Tabla 15 Indicadores de reactividad para las microcuencas Matadero en Puente y Matadero en Sayausí.	44
Tabla 16 Indicadores de reactividad.....	63

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1: Ubicación de la cuenca del río Tomebamba y división en microcuencas.....	16
Figura 2: Curva de duración de caudales.	21
Figura 3: Entrada y salida en un modelo de reservorio.....	23
Figura 4: Modelo de reservorio lineal	24
Figura 5: Separación de eventos.....	26
Figura 6: Curva de duración de caudales específicos de las microcuencas a lo largo del gradiente altitudinal durante el periodo de estudio.....	28
Figura 7: Hidrograma de Matadero en Sayausí.	37
Figura 8: Hidrogramas de las microcuencas Patoquinoas y Virgen del Cajas.	40
Figura 9: Hidrograma de las microcuencas Virgen del Cajas y Piscícola Chirimachay.	42
Figura 10: Hidrograma de las microcuencas Piscícola Chirimachay y Matadero en Puente.....	43
Figura 11: Hidrograma de las microcuencas Matadero en Puente y Matadero en Sayausí.	44
Figura 12: Evento 1 correspondiente a octubre de 2014.	45
Figura 13: Evento 2 correspondiente a enero de 2015	46
Figura 14: Evento 3 correspondiente a noviembre de 2018.....	46
Figura 15: Evento 4 correspondiente a mayo 2018.	47
Figura 16: Distribución de la precipitación a lo largo del gradiente altitudinal.	50
Figura 17: Separación de flujo de la microcuenca Patoquinoas.....	59
Figura 18: Separación de flujo de la microcuenca Virgen del Cajas	59
Figura 19: Separación de flujo de la microcuenca Piscícola Chirimachay	60
Figura 20: Separación de flujo de la microcuenca Matadero en Puente	60
Figura 21: Separación de flujo de la microcuenca Matadero en Sayausí.....	61
Figura 22: Hidrogramas de la microcuenca Patoquinoas y Virgen del Cajas, señalando eventos que llegaron al pico primero Patoquinoas.	61
Figura 23: Hidrogramas de las microcuencas Virgen del Cajas y Piscícola Chirimachay.	62
Figura 24: Hidrogramas de las microcuencas Piscícola Chirimachay y Matadero en Puente.....	62
Figura 25: Hidrogramas de la microcuenca Matadero en Puente y Matadero en Sayausí.	63



CLÁUSULA DE LICENCIA Y AUTORIZACIÓN PARA PUBLICACIÓN EN EL REPOSITORIO INSTITUCIONAL

Cláusula de licencia y autorización para publicación en el Repositorio Institucional

Johanna Maricela Reyes Pesántez en calidad de autora y titular de los derechos morales y patrimoniales del trabajo de titulación "Evaluación del comportamiento hidrológico de la cuenca del río Tomebamba a través del análisis de hidrogramas", de conformidad con el Art. 114 del CÓDIGO ORGÁNICO DE LA ECONOMÍA SOCIAL DE LOS CONOCIMIENTOS, CREATIVIDAD E INNOVACIÓN reconozco a favor de la Universidad de Cuenca una licencia gratuita, intransferible y no exclusiva para el uso no comercial de la obra, con fines estrictamente académicos.

Asimismo, autorizo a la Universidad de Cuenca para que realice la publicación de este trabajo de titulación en el repositorio institucional, de conformidad a lo dispuesto en el Art. 144 de la Ley Orgánica de Educación Superior.

Cuenca, 10 de enero de 2020

Johanna Maricela Reyes Pesántez

C.I: 0105860332

CLÁUSULA DE PROPIEDAD INTELECTUAL

Cláusula de Propiedad Intelectual

Johanna Maricela Reyes Pesántez, autora del trabajo de titulación "Evaluación del comportamiento hidrológico de la cuenca del río Tomebamba a través del análisis de hidrogramas", certifico que todas las ideas, opiniones y contenidos expuestos en la presente investigación son de exclusiva responsabilidad de su autora.

Cuenca, 10 de enero de 2020



Johanna Maricela Reyes Pesántez

C.I: 0105860332



DEDICATORIA

Detrás de cada logro se encuentran seres maravillosos, por lo que quiero expresar mi agradecimiento y dedicar este proyecto a mis padres Julia, Daniel, mi hermano José Luis, mi abuela Raquel, familiares y amigos. Quienes han sido pilar fundamental en mi formación personal y académica.

Dios le pague por el apoyo incondicional que me han brindado en todo el trayecto de mi vida.

Johanna R



AGRADECIMIENTOS

Expresar mi gratitud a la Universidad de Cuenca y a su Departamento de Recursos Hídricos y Ciencias Ambientales por la apertura y apoyo para la culminación de este proyecto, de manera especial al Dr. Rolando Célleri Rolando Célleri Alvear por su brillante dirección, su constante aporte de conocimiento.

Johanna R

1. INTRODUCCIÓN

Los páramos son ecosistemas de alta montaña ubicados en Sudamérica tropical, desde el Norte de Perú hasta el Sur de Venezuela, en un rango altitudinal desde 3200 hasta los 5000 metros sobre el nivel del mar (m s.n.m.) (Hofstede, Segarra, & Mena, 2003; Llambí et al., 2012). Su topografía es una combinación de valles en forma de “U” y planicies de origen glacial; derivando la aparición de lagunas, humedales, manantiales, entre otros cuerpos de agua (Pesántez, Mosquera, Crespo, Breuer, & Windhorst, 2018). Según la clasificación de la Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación (FAO), los suelos que predominan dentro de los páramos son histosoles y andosoles. Ambas clasificaciones contienen gran cantidad materia orgánica y porosidad considerable. Los suelos histosoles al encontrarse en zonas riparias están saturados la mayor parte de tiempo, predominando: almohadillas, bosque natural y pastos. En cambio, los andosoles se hallan en las laderas favoreciendo la aparición de pajonal (Mosquera et al., 2016).

La importancia de este ecosistema radica en la capacidad de sostener diversas funciones ecológicas y brindar servicios ecosistémicos relevantes como: conservación de la biodiversidad, regulación hídrica y por ende provisión de agua de calidad (Buytaert & Bievre, 2012; Buytaert, Cuesta-Camacho, & Tobon, 2011). La función de regulación hídrica en el páramo está influenciada por su capacidad para almacenar y liberar agua (Lazo, Mosquera, McDonnell, & Crespo, 2019), contribuyendo de manera constante al caudal superficial, incluso en épocas secas (Otaya, Leodán; Vásquez, 2008). Donde la vegetación y el tipo de suelo, desempeñan un rol importante debido a que permiten el almacenamiento y provisión del recurso, para las poblaciones que se encuentran aguas abajo (Daza, Hernández, & Triana, 2014).

Los páramos cubren amplias extensiones de terreno convirtiéndose en eje fundamental del abastecimiento de agua (Keating, 1998; Crespo et al., 2009). Cuenca, la tercera ciudad más importante del Ecuador, se beneficia del agua proveniente de los páramos. Está es atravesada por los ríos Tomebamba, Yanuncay, Machángara y Tarqui, de los cuales, los tres primeros abastecen a las distintas plantas de agua potable que posee la ciudad. Donde el agua que drena a través de la cuenca del río Tomebamba abastece de agua potable a cerca del 30% de la población cuencana (Pesántez, 2015).



Estos ecosistemas son biomas frágiles a diferentes actividades antrópicas (Wouter Buytaert et al., 2006)., contribuyendo de forma latente a una disminución de la regulación hídrica (Buytaert & Bievre, 2012; Buytaert, Cuesta-Camacho, & Tobon, 2011). De acuerdo con Jacobs et al., (2018)., indica que el cambio de uso de suelo provoca que el tiempo de retención del agua disminuya. Por otra parte, los efectos del cambio climático y la sensibilidad de los páramos al incremento de la temperatura inducen una variación en la estacionalidad y por ende en la precipitación y caudales (Ahmed, Shahid, & Nawaz, 2018; Urrutia & Vuille, 2009). Los efectos de estas variaciones se traducen en problemas como falta de agua en épocas secas e inundaciones en épocas lluviosas.

Debido a la alta variabilidad en la precipitación y caudales que se presenta en las cuencas de cabecera que abastecen a la ciudad. Desde el año 2012, se implementó el Observatorio Ecohidrológico Quinuas en la cuenca del Tomebamba, en un esfuerzo entre el Departamento de Recursos Hídricos y Ciencias Ambientales (iDRHICA) de la Universidad de Cuenca y la Subgerencia de gestión ambiental de Empresa Pública de Telecomunicaciones, Agua Potable, Alcantarillado y Saneamiento de Cuenca (ETAPA EP), para conocer el funcionamiento ecohidrológico de este sistema de alta montaña.

Existen estudios realizados para conocer el comportamiento hidrólogo de las cuencas de montaña. Por ejemplo Belesaca & Peláez (2018), Ochoa (2014) y Yadav & Wagener (2007), realizan mediante indicadores hidrológicos de regulación, relacionando con características de la cuenca como: uso de suelo, tipo de cobertura vegetal, humedad, topografía e hidrogeología. Por otra parte Vallejo (2014), Burbano (2015) y Naranjo (2018), relizan estudios en las cuencas los ríos Tarqui, Yanuncay y Tomebamba, donde se analizan si los eventos suceden simultáneamente en las tres microcuencas y relacionando el comportamiento con uso de suelo y cobertura vegetal. Proporcionando información sobre valores de caudal que causen riesgo, como información de alerta temprana de inundaciones en los tres ríos. Estos estudios, utilizan datos de lluvia y caudal, en donde verifican si los eventos suceden simultáneamente en las salidas de cada cuenca.

En este contexto, se identifica que no existen estudios del comportamiento interno de la cuenca del Tomebamba frente a eventos de inundaciones, a partir de un monitoreo distribuido en varios puntos dentro de la misma cuenca andina. Por lo que el análisis espacialmente distribuido de las características de estos eventos aportará significativamente a una mejor comprensión del comportamiento hidrológico del río. Lo

cual permite conocer el tiempo aproximando que tardan las crecidas en propagarse a lo largo de la gradiente altitudinal. Además, si estos eventos se generan o no de manera simultánea en toda la cuenca. Este conocimiento es necesario para enfrentar estos riesgos climáticos y de esta manera generar estrategias que reduzcan daños por posibles inundaciones, a través de mecanismos de alerta temprana como: modelos de pronóstico y/o ubicar estaciones de medición en sitios adicionales (Gao & Vogel, 2009).

La cuenca está influenciada por diversos factores intrínsecos de la zona, como la precipitación, tasa de infiltración de los suelos, evapotranspiración, topografía, clima, características hidráulicas, velocidad, frecuencia y cantidad de recarga; todos estos presentan una fuerte variación espacial. Sin embargo, la generación de flujo bajo y alto de los caudales también puede ser influenciado por factores antropogénicos y características de la cuenca que afectan directa o indirectamente al caudal (Gao et al., 2009). Según Mosquera et al. (2015), el flujo alto está influenciado principalmente por la cantidad de precipitación, la presencia de humedales con suelos histosoles y plantas colchón. En algunos casos se pueden dar inundaciones que son procesos naturales y dependen de variables climáticas (intensidad y duración de la lluvia), características de la cuenca (uso de suelo y morfología de la pendiente) (Berghuijs, Woods, Hutton, & Sivapalan, 2016). Mientras que, caudales bajos se relacionan con pendientes pronunciadas, suelos andosoles y pastos, esto debido a la evapotranspiración.

Para la determinación del comportamiento del flujo, se realiza mediante el cálculo y análisis de índices hidrológicos, así como también se puede llegar a estimar el grado de alteración hidrológica a la que se encuentra. Actualmente existen un sinnúmero de indicadores hidrológicos que ha sido desarrollado para describir el régimen de flujo. Sin embargo, la determinación de un índice óptimo para cuencas de montaña, es una de las tareas más importantes (Ochoa, 2014).

Por medio de indicadores se puede describir la capacidad de regulación y almacenamiento de la cuenca, así como la reacción que tiene frente a eventos extremos. Existen diferentes regímenes de flujo que regulan los procesos ecohidrológicos tales como: magnitud, frecuencia, duración y tiempo. Estos componentes pueden ser utilizados para conocer el comportamiento de una cuenca, mediante el estudio de la disponibilidad y distribución del recurso a lo largo de su gradiente altitudinal. Caracterizando la gama de flujos y fenómenos hidrológicos específicos, tales como inundaciones o flujos bajos que son críticos para la integridad de los ecosistemas fluviales (Olden & Poff, 2003).



1.1 Objetivos

Objetivo general

Evaluar el comportamiento hidrológico de la cuenca del río Tomebamba a través del análisis de hidrogramas observados a lo largo de la gradiente altitudinal.

Objetivos específicos

- Analizar la dinámica hidrológica entre los sitios de monitoreo a lo largo del gradiente altitudinal, a través de indicadores de regulación.
- Evaluar el comportamiento de la cuenca ante eventos extremos que ocasionaron inundaciones en la parte baja de la cuenca de la zona de estudio.

Estos resultados permitirán a futuro conocer el tiempo aproximado con el que podrían contar las instituciones para responder, permitiendo reducir los distintos riesgos asociados a estos eventos, con un enfoque no estructural. A partir de ello, se podrá elaborar planes de respuesta rápida ante estos eventos extremos, orientando en la toma de decisiones sobre la gestión de los recursos hídricos, de esta manera contribuir en la protección y conservación de los bosques de alta montaña.

2. MATERIALES Y MÉTODOS

2.1 Zona de Estudio

La cuenca del río Tomebamba está ubicada en el flanco oriental de la cordillera de los Andes, al sur del Ecuador en el cantón Cuenca (provincia del Azuay). Una parte de la cuenca pertenece al Parque Nacional Cajas (PNC) (Figura 1), y toda la cuenca es parte de la Reserva de Biósfera Macizo del Cajas declarada por la Unesco en 2013. La cuenca abarca un área aproximada de 325 Km² y su altitud varía entre 2500 – 4000 m s.n.m. Tiene su origen al límite norte del PNC, en el sector conocido como Tres Cruces, hasta su punto de confluencia con el río Yanuncay (Segarra, 2007).

El río Tomebamba atraviesa la zona norte de la ciudad de Cuenca, luego se junta con el río Machángara, formando el río Cuenca. El río Cuenca es afluente del río Paute, cuyas aguas llegan hasta el río Amazonas y finalmente al Océano Atlántico (Carrillo-Rojas, Silva, Córdova, Céleri, & Bendix, 2016; Tapia, 2016). Abastece de agua potable por medio de las plantas de tratamiento El Cebollar y Culebrillas. Cuentan con tres captaciones, denominada Río Tomebamba, ubicada en la cota de 2736 m s.n.m, con una captación de 1000 l/s. La segunda captación corresponde a Sayausí Alto – Paquitrancia, esta es captada en el río culebrillas en la cota 2872 m s.n.m. captando 437 l/s. Por último la captación de Sayausí Bajo – Culebrillas (Condo & Juela, 2017).

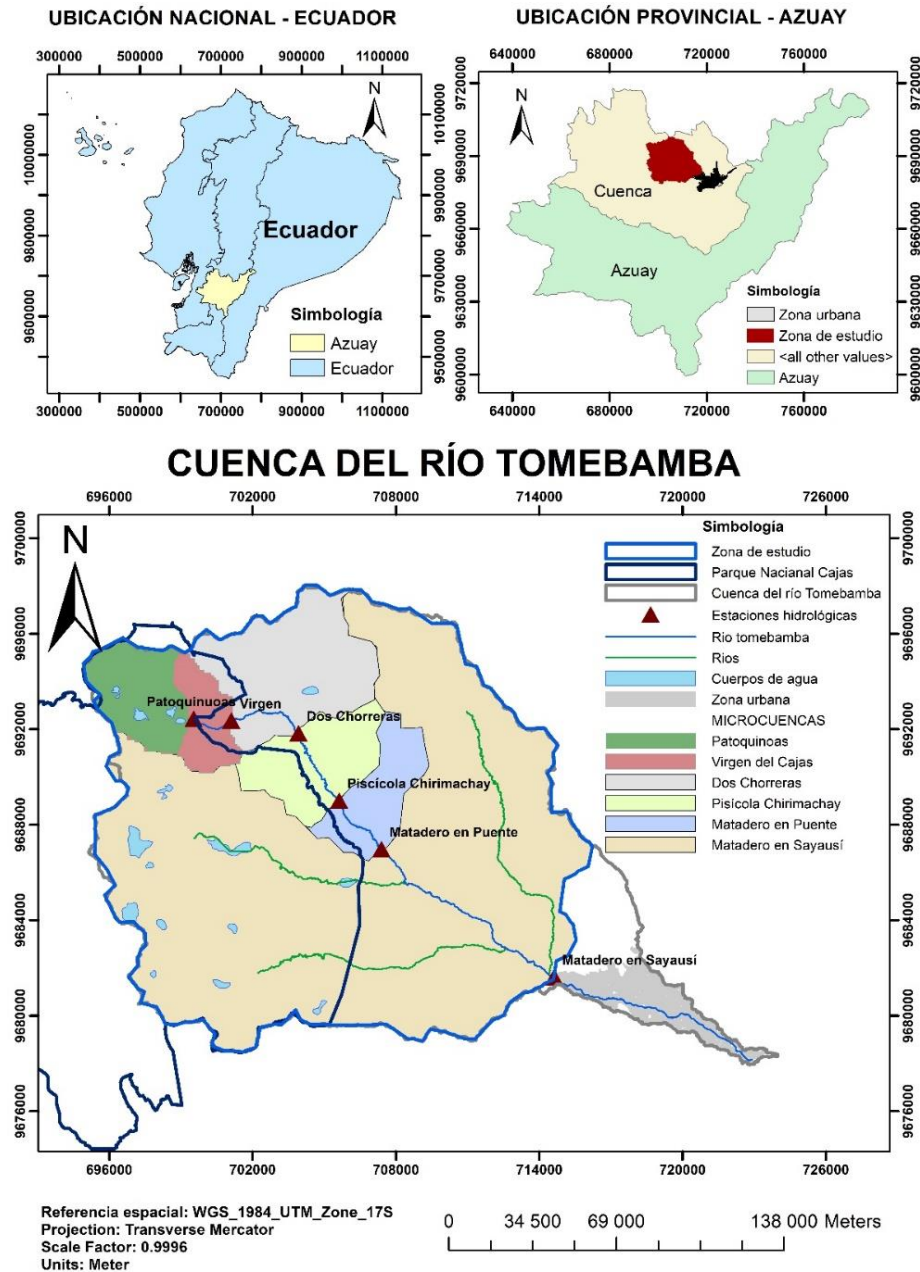


Figura 1: Ubicación de la cuenca del río Tomebamba y división en microcuenas
 Fuente: Reyes J (2019)

Para este estudio se considera seis estaciones de monitoreo, que van desde su punto más alto al sector Patoquinoas hasta su punto más bajo denominado Matadero en Sayausí, ver Figura 1 y Tabla 1.

La cuenca de río Tomebamba está caracterizada por presentar diferentes ecosistemas a lo largo de la misma, desde la microcuenca Patoquinoas hasta la microcuenca

Piscícola-Chirimachay existe presencia de ecosistemas de páramo y bosque montano alto. La vegetación predominante con más del 70% de la zona es pajonal (*Calamagrostis sp.*, y *Festuca sp.*), cohabita con parches de plantas de cojín (Sklenář & Jørgensen, 1999), y pequeños parches de bosque de *Polylepis sp.* y *Gynoxys sp.* (A. Crespo & Pinos, 2007). Mientras que entre las estaciones hidrológicas Matadero en Puente y Matadero en Sayausí encontramos un valle interandino, predominado por los arbustos, pastizales y pinos (W Buytaert, Iñiguez, Celleri, & De Bievre, 2006). En la parte baja de la zona de estudio, se encuentra zonas ganaderas, áreas destinadas al turismo y asentamientos humanos dispersos (Tabla 1).

El gradiente altitudinal de la cuenca (1400 m de desnivel), se presenta una variedad de temperaturas y precipitaciones, debido a la influencia de masas de aire provenientes de la cuenca del Amazonas y de la Zona de Convergencia Intertropical (ZCIT). Las temperaturas varían entre 5.4°C y 8.8 °C (Córdova et al., 2016). Celleri, Willems, Buytaert, & Feyen, (2007), afirman que la distribución de la precipitación es altamente compleja, presentado un régimen de precipitación bimodal bien marcado en la parte baja y medianamente marcado en la parte alta. Anualmente se presentan precipitaciones entre 800 mm y 1500 mm en el gradiente (Muñoz, Céleri, & Feyen, 2016).

Tabla 1

Puntos de muestreo para el estudio en el transecto Patoquinoas – Matadero en Sayausí

Microcuenca	Área (Km ²)	Tipo de vegetación
Patoquinoas	14.5	Cuerpos de agua, pajonal, pasto bajo.
Virgen del Cajas	23.2	Pajonal, pasto mixto alto/bajo.
Dos Chorreras	54.7	Pasto alto, bosque nativo.
Piscícola Chirimachay	73.1	Pasto alto, bosque.
Matadero en Puente	86.8	Pasto alto, bosque de Polilepys.
Matadero en Sayausí	302.8	Cultivos, pasto y asentamientos dispersos.

Fuente: Modificación del autor (Carrillo-Rojas et al., 2016)

2.2 Datos

2.2.1 Red de monitoreo de caudal

Existen dos entidades a cargo del monitoreo de caudal de la cuenca del río Tomebamba, los cuales abarcan estaciones localizadas a lo largo de la gradiente altitudinal. Por una parte, el Departamento de Recursos Hídricos y Ciencias Ambientales (iDRHICA) de la



Universidad de Cuenca, opera el “Observatorio Ecohidrológico Quinuas”. Por otra parte, la Empresa Pública Municipal de Telecomunicaciones, Agua Potable, Alcantarillado y Saneamiento del Cantón Cuenca (ETAPA EP), administra la una red Hidrometeorológica, ubicadas en varias subcuencas hidrográficas del cantón, incluido el monitoreo del Parque Nacional Cajas. El objetivo de ambas redes de monitoreo es determinar el comportamiento hidrológico de la cuenca, así como optimizar el manejo del recurso hídrico, contar con información para proyectos de investigación y la planificación del territorio.

Los datos de caudal obtenidos de las dos entidades corresponden a las estaciones Patoquinoas, Virgen del Cajas, Piscícola Chirimachay, Matadero en Puente, Matadero en Sayausí y nivel para la estación Dos Chorreras.

2.2.2 Selección de estaciones y periodo de análisis.

Considerando las dos entidades que realizan un monitoreo en la zona de estudio, la elección de las estaciones de control y su correspondiente microcuenca asociada, se fundamentó principalmente en la disponibilidad de información coincidente en el tiempo. Dicha información debe ser confiable y el periodo de información lo más amplio posible. En general, se contó con información de aproximadamente cinco años, en el periodo comprendido entre Enero-2014 a diciembre-2018. Las estaciones Patoquinoas, Virgen del Cajas, Piscícola Chirimachay y Matadero en Sayausí cuentan con información en todo el periodo de estudio. Mientras Matadero en Puente y Dos Chorreras se reduce a dos años, tal como se observa en la Tabla 2.

A partir de las consideraciones anteriores, el estudio se realizó con datos de seis estaciones de las cuales cuatro corresponden estaciones operadas por iDRHICA y dos estaciones por ETAPA EP. Los cuales se pueden observar en la Tabla 2.

Tabla 2

Descripción de los puntos de monitoreo y disponibilidad de información durante el período 2014 - 2018.

Estación	Coordenadas*			Red de origen	Disponibilidad de datos	% de vacíos
	X	Y	Z			
Patoquinoas	699536	9692436	3800	ETAPA	05-08-2014 – 22-01-2018	12%
Virgen del Cajas	701111	9692360	3622	iDRHICA	01-01-2014 – 31-12-2018	3%
Dos Chorreras	703919	9691829	3451	iDRHICA	15-01-2015 – 08-12-2016	5%
Piscícola Chirimachay	705626	9689011	3312	iDRHICA	14-05-2014 – 31-12-2018	10%
Matadero en Puente	707391	9686975	3209	iDRHICA	01-01-2014 – 08-12-2016	15%
Matadero en Sayausí	714620	9681624	2712	ETAPA	01-01-2014 – 31-12-2018	1%

Fuente: Reyes J (2019)

(* Datum de referencia: WGS84)

2.2.3 Procesamiento de la información

Los datos de caudal obtenidos para el presente estudio tienen una resolución temporal de cinco minutos. Sin embargo, para este tipo de estudios es común usar una escala horaria, se puede citar a Crespo et al. (2011) que realizó con datos escala horaria puede existir menor variación en el flujo. A partir de lo anterior se realizó un cronograma de fechas, de manera que permita la visualización de los periodos en los que se dispone de información en todas las estaciones a ser analizadas.

Para eliminar el efecto del tamaño de la cuenca y comparar entre microcuencas, es necesario calcular el caudal sobre unidad de superficie, es decir, caudal específico. Comúnmente la descarga se expresa en unidades de flujo [m^3/s o l/s], una vez transformado a caudal específico se expresan en [$l/s/Km^2$].

2.3 Análisis de la dinámica hidrológica de la cuenca

Esta evaluación se realizó en primera instancia considerando datos de todo el periodo de estudio (cinco años). En una segunda fase, se consideraron datos correspondientes a dos periodos identificados como seco y húmedo, los cuales se explican a continuación.

Definición de periodos secos y húmedos

Para tener una idea inicial del comportamiento de la cuenca, se grafica series de tiempo de los datos disponibles en cada estación, ubicada a lo largo de la gradiente altitudinal. Luego de realizar la validación de los datos, se graficaron series estacionales para el periodo húmedo de cada año y así identificar los patrones de comportamiento característicos de cada una de ellas. La selección de los periodos se realizó mediante hidrogramas observados en la parte baja de la zona de estudio y por revisión bibliográfica sobre estudios de precipitación.

2.3.1. Análisis de todo el periodo de estudio

Análisis de duración de caudales

En este primer análisis se realiza la comparación entre microcuencas, a lo largo de la gradiente altitudinal. Para analizar la variabilidad del flujo, comúnmente se emplean curvas de duración de caudal, las cuales relacionan el flujo contra el porcentaje de tiempo durante el cual el caudal es igualado u excedido (Subramanya, 2008).

La pendiente de la curva de duración, es un indicador de la capacidad reguladora de presenta una cuenca, evaluando los valores extremos tanto el flujo alto como bajo. Por ejemplo, el comportamiento del flujo rápido se evidencia en la primera parte de la curva, presentándose una fuerte pendiente cuando las avenidas son cortas. Por el contrario, una pendiente suave cuando la microcuenca tiene mayor regulación. Por otra parte, el flujo lento se presenta en la parte final de la curva, indicando el porcentaje del tiempo que permanece el caudal bajo (Rosburg, 2015).

Para indicar el régimen de caudales altos y bajos en la curva de duración de caudales se pueden realizar por medio de percentiles (Clausen & Biggs, 2000). Para este análisis, se escogieron umbrales basados en la forma de la pendiente de la curva de duración de cada microcuenca. Sin embargo, como referencia Ochoa (2014) y Martínez, Coello, & Feyen (2017) utilizan el percentil 90 y 10, los cuales indican flujos extremos bajo y alto, respectivamente. Un ejemplo de la curva de duración se puede apreciar en la Figura 2, señalando el caudal alto y bajo por medio de percentiles.

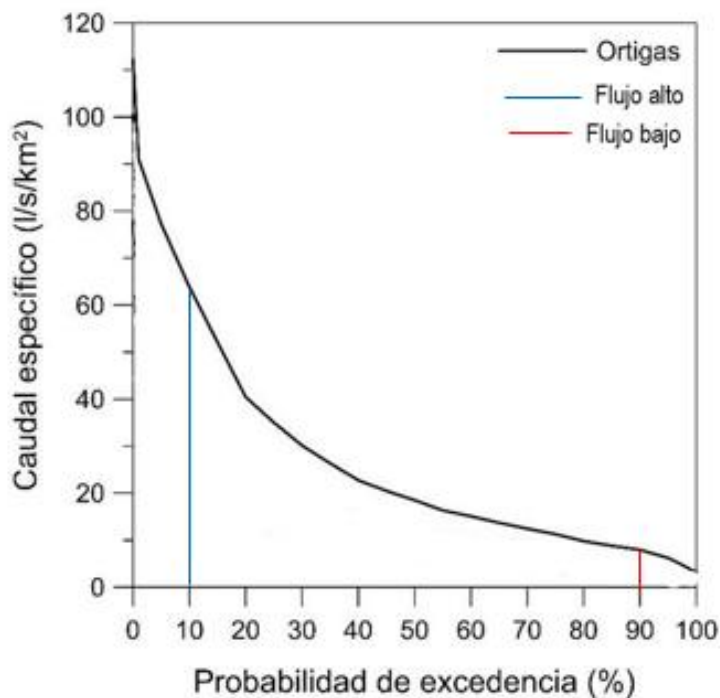


Figura 2: Curva de duración de caudales.
Fuente: (Martínez et al., 2017)

Persistencia, frecuencia y tiempo de eventos

La persistencia se cuantifica por medio del número de días continuos máximo y promedio que se encuentran bajo o sobre los umbrales, determinados a partir del análisis de la curva de duración de caudales que indiquen el flujo alto, medio y bajo.

Por otra parte, se analizó variables de inundación utilizando un umbral, el cual indica el caudal alto obtenido de la curva de duración de caudales. Este análisis se basan en determinar un valor promedio de (1) persistencia de eventos de flujo alto definido en el anterior párrafo (DUR); (2) frecuencia del flujo alto (FRE) que es la cantidad de eventos de caudal alto por año; (3) el tiempo total (TIM) en el que el río estuvo más alto que el umbral de caudal alto. Para encontrar el tiempo total de los eventos se multiplica la frecuencia y duración (Clausen & Biggs, 2000; Olden & Poff, 2003). Por ejemplo en un estudio realizado en Clausen (1997) para el río Waiwakaiho, se dieron 33 eventos de precipitación excediendo el umbral definido (15 m³/s), la persistencia media de los eventos fue de 1.7 días. Por lo tanto el tiempo en el que el río estuvo con caudal alto (TIM= FRE X DUR) fue de 56 días/año. A través de estos indicadores permite describir los picos moderados que se pueden presentar en la cuenca

Índice de flujo base (BFI)

El índice de flujo base permite una mayor comprensión de los procesos hidrológicos (Beck et al., 2013). Una vez transcurrido un evento de precipitación, una parte de ello se convierte en escorrentía superficial, otra parte se infiltra en el suelo y se transforma en flujo subsuperficial, por último, una parte del flujo puede almacenarse para luego convertirse en caudal base (Singh, Pahlow, Booker, Shankar, & Chamorro, 2019a). Según Chapman (1999), el índice de flujo de base (BFI) se define como “la relación entre el flujo base promedio y el caudal total”, es adimensional y puede variar de 0 a 1 (Lott & Stewart, 2016).

$$BFI = \frac{\text{Caudal base}}{\text{Caudal total}} \quad \text{Ecuación 1}$$

Por otra parte se analiza la constante de recesión (k), el cual describe la velocidad de disminución del flujo, después de un evento precipitación (Beck et al., 2013), es decir, que tan lento es desalojada el agua del reservorio, se determina a través de la pendiente de los tramos de recesión en el flujo base, sub superficial, y superficial (Willems, 2004). Se considera un buen estimador de la capacidad de amortiguamiento de una cuenca frente a eventos de precipitación alta. La velocidad de la escorrentía superficial y sub superficial es de minutos y horas, mientras que el flujo base es de días o meses, dependiendo del tamaño de la cuenca de interés (Llambí et al., 2012).

La separación del flujo puede ser obtenida por medio de técnicas de separación basadas en modelos de reservorios lineales. Tal como se realiza por medio del software WETSPRO (Water Engineering Time Series PROcessing tool), donde la serie continua de caudales es ingresada en el programa, y se ajustan parámetros como: constante de recesión k , parámetro de reducción w , el mismo que va de 0 a 1 e indica la fracción de caudal se convertirá en caudal base. Estos parámetros se calibran iterativamente y su correcta estimación se determina de forma visual (Willems, 2009).

El modelo de reservorio lineal se describe como la Figura 3, donde se describe las entradas como la precipitación en la cuenca, salidas como la escorrentía de la cuenca y un tanque de almacenamiento.

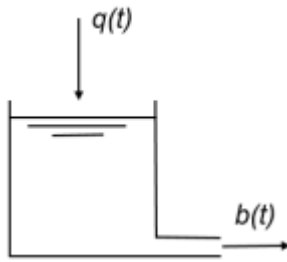


Figura 3: Entrada y salida en un modelo de reservorio

Fuente: Reyes J (2019)

La interpretación física de este modelo de reservorio lineal, se observa en la Figura 3, donde la descarga de flujo de salida $b(t)$ depende de la entrada de caudal $q(t)$, se puede representar a través de la siguiente ecuación:

$$b(t) = \exp\left(-\frac{1}{k}\right) b(t-1) + (1 - \exp\left(-\frac{1}{k}\right)) \left(\frac{q(t-1)+q(t)}{2}\right) \quad \text{Ecuación 2}$$

Donde:

$b(t-1)$ es el caudal de escorrentía en el tiempo $t-1$

$\left(\frac{q(t-1)+q(t)}{2}\right)$ es la precipitación de entrada en el tiempo $t-1$ y en el tiempo t ; se emplea el promedio de la precipitación

Con la siguiente ecuación 3 se puede simplificar en la ecuación 4.

$$\alpha = \exp\left(-\frac{1}{k}\right) \quad \text{Ecuación 3}$$

$$b(t) = \alpha b(t-1) + (1 - \alpha) \left(\frac{q(t-1)+q(t)}{2}\right) \quad \text{Ecuación 4}$$

El parámetro del modelo de reservorio lineal es la constante de recesión (k), la unidad es el tiempo e indica el tiempo que necesita el agua para llegar a la salida. El tiempo de recesión (k) para el flujo superficial, subflujo y el flujo base. Se puede determinar el valor de k analizando la pendiente de los tramos de recesión en cada caso (flujo base, sub superficial, superficial) en los periodos de recesión, se reduce a una fracción exponencial. Las constantes de recesión se pueden calibrar como el valor promedio del inverso de la pendiente en los periodos de recesión de un $\ln(q)$ (Figura 4). Cuando se considera un número de tiempos de paso durante los periodos de recesión, la constante de recesión puede ser calculada de acuerdo con:

$$\frac{\ln(q(t-s)) - \ln(q(t))}{s} = \frac{1}{k} \quad \text{Ecuación 5}$$

Donde:

q = caudal (m³/s)

t = número de tiempo de pasos

s = constante de recesión

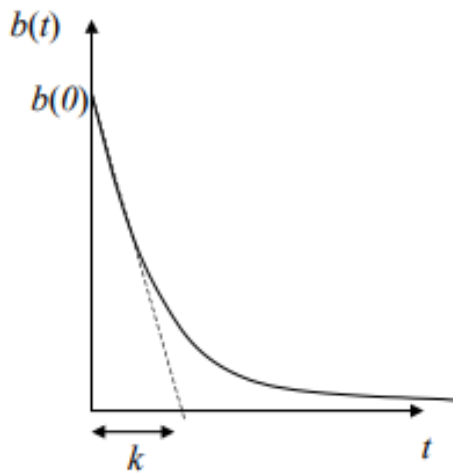


Figura 4: Modelo de reservorio lineal

Fuente: Reyes J (2019)

Índice de flujo de inundación (FFI)

El cálculo de FFI es una modificación del procedimiento para calcular el índice de flujo base (BFI). El FFI se define como la relación entre el caudal acumulado por encima del caudal base (flujo de inundación) para el flujo base. El BFI toma valores entre 0 y 1, mientras que FFI puede ir desde 0 hasta infinito y es adimensional (Clausen, 1997). Se calcula de la siguiente manera:

$$FFI = \frac{1-BFI}{BFI} \quad \text{Ecuación 6}$$

2.3.2 Análisis por periodos

Análisis comparativo de los caudales a lo largo del gradiente altitudinal para periodos seco y húmedo.

Análisis hidrológico para periodo húmedo y seco

Para esta sección se analizó los siguientes indicadores: caudal específico máximo y mínimo, registrado en los periodos de estudio. Así como también la variabilidad en los caudales específicos, mediante la relación del caudal máximo/mínimo y el coeficiente de variación. Por medio de este último indicador se puede tener una idea general de la capacidad de regulación que presenta una cuenca, el cual es definido como la relación entre la desviación estándar y el promedio de todos los datos de caudal. Indicando una alta variabilidad cuando está influenciada por eventos extremos, por lo que la cuenca no tiene buena regulación (Olden & Poff, 2003; Clausen & Biggs, 2000).

Análisis de Reactividad

Se analiza la reacción, es decir, la respuesta que tiene cada microcuenca frente a diferentes eventos de precipitación, para esta sección se toma en cuenta los hidrogramas del periodo húmedo de todos los años. Se compara el comportamiento entre pares de microcuencas a lo largo de la gradiente altitudinal. Los pares de microcuencas corresponden a Patoquinoas – Virgen del Cajas, Piscícola Chirimachay – Virgen del Cajas, Piscícola Chirimachay - Matadero en Puente, Matadero en Puente – Matadero en Sayausí. En la Tabla 3 se presentan los indicadores que son utilizados para analizar la reactividad que tiene cada microcuenca. De los cuales algunos son utilizados en esta sección y otros para la siguiente sección.

Tabla 3

Indicadores de reactividad, para analizar los hidrogramas.

Indicador	Concepto
Inicio y fin del evento.	Se indica la fecha y hora de la subida en el hidrograma y al finalizar el evento justo antes de que empieza una nueva subida.
Tiempo al pico	Usado para identificar qué microcuenca llega más rápido al pico o valor más alto de caudal antes de empezar a descender. Es el tiempo en horas que le toma a la rama ascendente del hidrograma llegar a su punto máximo desde que empieza el evento.
Tiempo de descenso	Se usó para analizar que microcuenca se recupera más rápido luego de una crecida antes de otro evento. Es el tiempo en horas que le toma a la rama descendente del hidrograma bajar desde el punto más alto hasta el momento justo antes que empiece a subir nuevamente.

Tiempo del evento	La suma del tiempo de subida y bajada indica las duraciones de los eventos por microcuenca. Es el tiempo en horas que dura un evento visualizado en el hidrograma.
Tasa media de ascenso	Es la pendiente que se aprecia en el hidrograma hasta llegar al pico.
Tasa promedio de descenso	Es la pendiente con la que desciende el evento, desde el pico hasta el momento justo antes que comience a subir de nuevo, visualizado en el hidrograma.

Fuente: (Llanos, Garfias, & Bâ Mamadou, 2002)

2.4 Análisis de eventos extremos

Los eventos seleccionados son aquellos que hayan causado inundaciones y/o pérdidas materiales en la parte baja de la zona de estudio de la cuenca del río Tomebamba. Los eventos son definidos en función de información recopilada de boletines de prensa e informes técnicos de ETAPA EP. Por otra parte, también se tomó en cuenta que las microcuencas a ser analizadas tengan información en la fecha en el que ocurrió el evento.

El análisis de un evento es muy importante ya que puede estar influenciado por eventos anteriores, por lo que es necesario separar los eventos para poder analizar. Según (Shakti, Shrestha, & Gurung, 2010; Rodas, 2018), para considerar dos eventos sucesivos independientes, el tiempo p entre dos picos es más grande que la constante de recesión k , y cuando la descarga más baja entre los dos picos es menor al caudal base o igual (Figura 5).

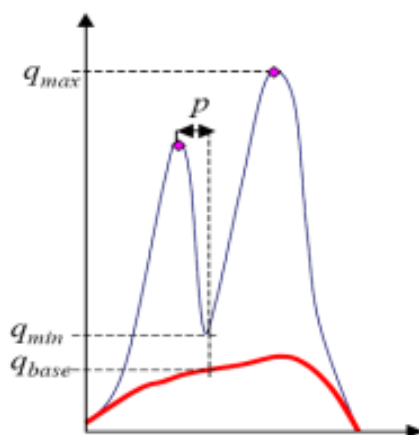


Figura 5: Separación de eventos

Fuente: Reyes J (2019)

Los indicadores usados por evaluar los eventos fueron el tiempo al pico, tiempo de descenso, tasa promedio de ascenso y descenso, siendo los mismos que se usaron para la reactividad y están descritos en la Tabla 3. Analizar la sensibilidad a eventos de lluvia da indicios de mejores o peores condiciones de regulación. Adicionalmente se usó la relación entre el caudal específico máximo y caudal específico mínimo por evento, el mismo que muestra el rango de variabilidad que tiene cada evento en cada una de las microcuencas.

3. RESULTADOS, INTERPRETACIÓN Y DISCUSIÓN

3.1 Análisis de la dinámica hidrológica de la cuenca

3.1.1. Análisis para todo el periodo de estudio

Este análisis corresponde a todo el periodo de estudio de cinco años, donde se evaluó de manera general el comportamiento de la cuenca a lo largo de su gradiente altitudinal.

Análisis de duración de caudales

En esta sección se analizó la duración de caudales que tiene cada microcuenca, para lo cual se construyeron las curvas de duración de caudales específicos, como se puede observar en la Figura 6. De los cuales se determinaron los caudales específicos asociados a varios porcentajes de excedencia de acuerdo a la pendiente de la curva.

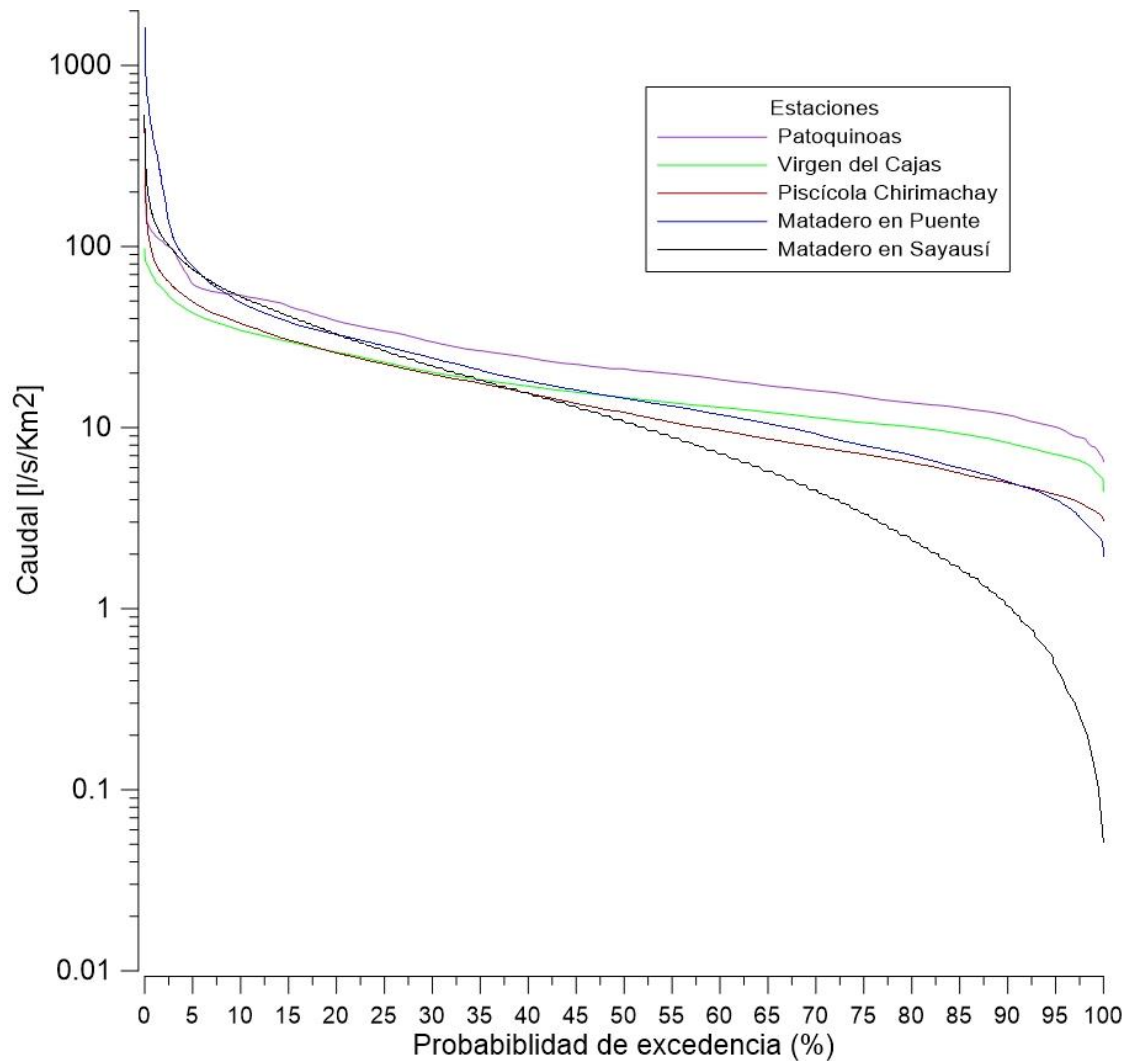


Figura 6: Curva de duración de caudales específicos de las microcuencas a lo largo del gradiente altitudinal durante el periodo de estudio.
Fuente: Autor (2019)

A partir de esto, se distinguen tres tramos (pendientes) en las curvas de duración, los cuales se pueden observar en la Tabla 4: el primero se define como caudales específicos altos a aquellos que exceden las magnitudes calculadas como percentil P5. El segundo indica el flujo moderado, comprendido entre los percentiles P5 y el percentil P90, y el último a aquellas magnitudes a partir del P90, correspondiente a caudales bajos. Este comportamiento es similar en toda la cuenca, a excepción de Matadero en Sayausí en el que se distinguen cuatro tramos: el flujo extremo alto, el cual corresponde a los caudales observados hasta el P5. Flujo alto, con caudales desde P5 al P30, flujo moderado, que se encuentra entre el P30 y P75. Luego de esto, se presentan caudales bajos desde el 80% de excedencia.

Tabla 4
Pendientes de la curva de duración de caudales

Microcuencas	Flujo alto	Flujo medio	Flujo bajo
Patoquinoas	87°	31°	16°
Virgen del Cajas	84°	21°	10°
Piscícola	89°	28°	18°
Chirimachay			
Matadero en Puente	90°	40°	16°
Matadero en Sayausí	89°	Flujo alto 65° Flujo moderado 21°	7°

Fuente: Reyes J (2019).

Caudales altos

Las curvas de duración de Matadero en Sayausí, Matadero en Puente y Piscícola Chirimachay tienen una pendiente pronunciada. Este tipo de declive indica que existe caudales altos durante menos tiempo y por ello respuestas más rápidas a los eventos extremos de precipitación. Mientras Patoquinoas y Virgen del Cajas, al inicio de la curva tienen una pendiente relativamente suave, representando una mayor capacidad de almacenamiento (Yadav & Wagener, 2007).

Analizando la duración de caudales altos, como se observa en la Tabla 5 se apreció que la microcuenca Matadero en Puente tiene caudales específicos más altos comparados con las otras microcuencas. Mientras Virgen del Cajas presenta menor caudal específico hasta el 25% de excedencia. De acuerdo a Crespo et al. (2011), señalan que los caudales altos están controlados por la cantidad de precipitación que se presenta en una cuenca, es decir, que en la parte media de la zona de estudio existe la presencia de mayor precipitación tal como se comprueba en un estudio realizado por (Tapia, 2016). Además de la capacidad física del suelo presentándose un exceso de infiltración y saturación, es decir que el suelo se ha saturado al 100% (Wouter Buytaert et al., 2006).

Caudales medios

En el caudal moderado se observó en la Tabla 6, existe un comportamiento conforme aumenta el tamaño de la cuenca de estudio existe un menor aporte de agua.

Por encima del nivel de probabilidad de excedencia del 10%, la microcuenca Patoquinoas presenta una clara permanencia de caudales específicos mayores en relación a otras microcuencas, consiguiendo un alto aporte de caudal durante la mayor parte del año. Este comportamiento estaría explicado por la escasa actividad antrópica,

por ende, una menor compactación del suelo. Además, por la presencia de la laguna de Patoquinoas justo aguas arriba de la estación, la cual controlaría el flujo de agua.

Caudales bajos

En el último tramo, las microcuencas que se encuentra en la parte alta y media de la gradiente altitudinal tienen en promedio igual pendiente (Tabla 4). Los caudales más bajos corresponden a Matadero en Sayausí a partir del percentil P35, logrando caudales menores a 1 l/s/km² que representan el 10 % de los datos (Tabla 5). Esto se puede interpretar que en Matadero en Sayausí durante la mayor parte del tiempo, tiene un bajo aporte de caudal específico.

Analizando de manera general el comportamiento de las curvas de duración que se identificó en la Figura 6, Tabla 4 y Tabla 5. Virgen del Cajas en su parte central tiene una forma bastante plana, similar a ríos de llanura, ya que al inicio y final de la curva presenta una pendiente suave, presentando caudales específicos entre 4 y 97 l/s/km² (Yadav & Wagener, 2007). Por lo que la cuenca que drena a este punto tiene una respuesta más lenta a eventos de precipitación, representando una gran capacidad de almacenamiento y por ende alta regulación. La curva de Patoquinoas presenta el mismo comportamiento con caudales específicos entre los 7 y 200 l/s/km². Este comportamiento se relaciona directamente con la cobertura vegetal que cumple la función de esponja, permitiendo el almacenamiento de agua y asegurar el recurso para estaciones de secas. Esta zona está protegida, al encontrarse dentro del PNC, manteniendo sus características intactas. Por lo que radica la importancia de conservación del bosque, corroborado en un estudio realizado por Cisneros et al. (2014) en donde indica la importancia de conservación del bosque nativos con el fin de preservar el recurso hídrico.

Por otro lado, los resultados de Piscícola Chirimachay muestran un leve aumento en la pendiente de la curva de duración, con caudales específicos entre 3 l/s/km² y 400 l/s/km², tal como se observa en la Figura 6 y en la Tabla 5. Este comportamiento de la pendiente representa una leve disminución en la capacidad de almacenamiento del suelo (Buytaert, Iñiguez, Celleri, & De Bievre, 2006; Crespo et al., 2009), en comparación con las microcuencas que se encuentran en la parte alta de la cuenca. Esto es debido a que el porcentaje de cobertura vegetal (páramo) se reduce y es reemplazado por cultivos y pasto.

Las microcuencas Matadero en Sayausí y Matadero en Puente tienen menor capacidad reguladora dentro de la cuenca de estudio, al presentar una pendiente pronunciada. Tal como señala Cisneros et al. (2007), sobre la pendiente de la curva de duración en una cuenca degradada en el primero tramo es prácticamente vertical (Tabla 5) y puede llegar a un caudal bajo en épocas de verano, por ende tiene baja capacidad reguladora. Un estudio realizado por Bruijnzeel (2004) afirma que, actividades como pastoreo y agricultura afectan negativamente a la capacidad de retención de agua en el suelo.

En la Tabla 5 se encuentran los porcentajes de excedencia más representativos de la curva de duración. Los valores de caudales altos en Patoquinoas, Matadero en Sayausí y Matadero en Puente se encuentran entre 61 y 77 l/s/km². Sin embargo, para Virgen del Cajas y Piscícola Chirimachay es casi la mitad de Matadero en Puente. Esta diferencia se estaría explicado debido a que los procesos que forman caudales picos son distintos a lo largo de la gradiente altitudinal. Para caudales medios se observó una clara disminución en la magnitud a medida que aumenta el tamaño de la cuenca. En promedio sus valores son similares, a excepción de Patoquinoas que tiene mayor aporte de agua a la microcuenca. Para caudales bajos tiene el mismo comportamiento que los caudales medios, con valores entre 11.69 y 1 l/s/km² en Patoquinoas y Matadero en Sayausí, respectivamente.

Tabla 5
Caudales específicos asociados a varios porcentajes de excedencia.

Microcuencas	Percentil 5 [l/s/Km ²]	Percentil 50 [l/s/Km ²]	Percentil 90 [l/s/Km ²]
	Caudal específico alto	Caudal específico medio	Caudal específico bajo
Patoquinoas	61.94	21.05	11.69
Virgen del Cajas	42.94	14.58	8.19
Piscícola	49.48	12.05	4.91
Chirimachay			
Matadero en Puente	77.61	14.40	4.89
Matadero en Sayausí	74.86	10.66	3.30*

Fuente: Reyes J (2019).

(* Corresponde al percentil 75 para Matadero en Sayausí)

Persistencia de caudales

A través de la curva de duración de caudales se escogieron los umbrales para caudales específicos que representen el flujo alto y bajo. Los percentiles utilizados para caudales

altos corresponden al percentil 5 y para flujo bajo el percentil 90. Para el análisis de persistencia se determina el máximo y el promedio de días continuos en el que el caudal se mantiene sobre y bajo los umbrales mencionados en la Tabla 5.

Los resultados encontrados en la Tabla 6, señalan el número de días continuos en el que el caudal permanece alto y bajo. Las microcuencas Virgen del Cajas y Patoquinoas permanecen en promedio dos días seguidos con caudal alto. Estas microcuencas se mantienen con caudal más alto (2 veces más) que la parte media – baja de la zona de estudio, quienes presentan permanencia de caudales altos durante un día. De la misma manera, para el flujo medio indica que la microcuenca Patoquinoas los flujos permanece en promedio 12 días continuos con caudal medio, esto se explica por la regulación de caudales que realiza la Laguna Patoquinoas que se encuentra a la salida de la microcuenca.

La evaluación de permanencia de caudales bajos indicó que las microcuencas Patoquinoas, Virgen del Cajas y Matadero en Sayausí permanecen en promedio de cuatro a dos días continuos por debajo de los umbrales. Mientras Piscícola Chirimachay y Matadero en Puente permanecen por lo menos un día.

Tabla 6

Comparación de la persistencia de caudales entre microcuencas mediante los indicadores: Máximo y promedio de número de días continuos en el que el caudal permanece bajo o sobre los umbrales.

Percentil	Indicadores	Patoquinoas	Virgen del Cajas	Piscícola Chirimachay	Matadero en Puente	Matadero en Sayausí
P5	Max [Días]	8	8	6	7	5
	Promedio [Días]	2	2	1	0.33	1
P50	Max [Días]	80	69	30	40	125
	Promedio [Días]	12	5	2	1	4
P90	Max [Días]	30	23	11	12	24*
	Promedio [Días]	4	2	1	1	4*

Fuente: Reyes J (2019)

(*Corresponde al percentil 75 para Matadero en Sayausí)

Los resultados concuerdan con la curva de duración ya que indican que las microcuencas Matadero en Sayausí, Matadero en Puente y Piscícola Chirimachay permanecen menos tiempo con caudales altos, indicando que el agua es evacuada más

rápido que en la zona alta de la cuenca de estudio. Sin embargo, Matadero en Puente permanece con caudales altos más tiempo, por lo que se puede interpretar que existe mayor aporte de precipitación. Mientras Patoquinoas y Virgen del Cajas permanecen con caudales altos más días, con menor magnitud a las microcuencas que se encuentran en la parte baja de la zona de estudio del río Tomebamba; un factor influyente en estas microcuencas es la presencia de cobertura vegetal (páramo).

Análisis de eventos al año

Para este análisis se utilizó el P5 que define el flujo alto, a través del indicador que señala en promedio el número de eventos ocurridos en un año y número de días que el caudal permanece alto. En la Tabla 7 se indican la frecuencia y tiempo de eventos que se dan anualmente. Donde la microcuenca Matadero en Puente presentó 53 eventos por año, de flujo alto, superior al resto de microcuencas. Mientras Patoquinoas y Virgen del Cajas presentan seis veces menos eventos que Matadero en Puente. Por otra parte, se identificó que el número de días que el caudal permanece alto es de 20 días/año para Patoquinoas, seguido de Virgen del Cajas, Piscícola Chirimachay y Matadero en Puente con 18 días/año. Matadero en Sayausí presenta 17 días/año que el caudal permanece alto a 74.86 l/s/km².

Tabla 7

Frecuencia y tiempo de eventos en el que persiste el flujo alto

Estaciones	Frecuencia promedio [Eventos/año]	Tiempo promedio [Días/año]
Patoquinoas	8	20
Virgen del Cajas	10	18
Piscícola	34	18
Chirimachay	34	18
Matadero en Puente	53	18
Matadero en Sayausí	34	17

Fuente: Reyes J (2019)

Índice de flujo base (BFI)

Se realizó la separación de flujos por medio de la calibración de la constante de recesión k para el flujo superficial, subsuperficial y flujo base. Los resultados se observan en la Tabla 8.

Tabla 8

Separación de flujo (constante de recesión) e índice de flujo base.

Estación	Índice de Flujo base (BFI)	Constante de recesión (k)		
		Flujo base [Días]	Interflujo [Días]	Flujo superficial [Días]
Patoquinoas	0.63	18	6	1
Virgen del Cajas	0.62	18	4	1
Piscícola	0.58	16	3	1
Chirimachay				
Matadero en Puente	0.46	14	3	0.25
Matadero en Syausí	0.49	6	2	0.33

Fuente: Reyes J (2019)

Los resultados de las microcuencas Patoquinoas y Virgen del Cajas indicaron que la proporción de caudal base sobre escorrentía total es 0.63 y 0.62, respectivamente. Mostrando valores superiores a Piscícola Chirimachay, Matadero en Puente y Matadero en Syausí que tiene un menor valor del índice de flujo base correspondiendo a 0.58, 0.46 y 0.49, respectivamente. La respuesta hidrológica es más lenta en las microcuencas Patoquinoas y Virgen del Cajas ya que la constante de recesión del flujo base es de 18 días, seguido de Piscícola Chirimachay con 16 días, Matadero en Puente y Matadero en Syausí que tienen 14 y 6 días, respectivamente.

El interflujo en la microcuenca Patoquinoas se mantiene al menos seis días, mientras Matadero en Syausí dos días. El flujo rápido generado por eventos de precipitación, permanece por lo menos un día en la microcuenca Patoquinoas, mientras que en Matadero Puente y Matadero Syausí son alrededor de seis a ocho horas.

En la microcuenca Patoquinoas se encontraron valores superiores de flujo base, debido principalmente a que la fuente de recarga son las lagunas, las cuales proporcionan caudal base durante todo el año. Otro factor influyente son el tipo de suelo profundo y la cobertura vegetal, conservándose estas características intactas (Abebe & Forch, 2014; Céleri Alvear, De Bièvre, & Iñiguez, 2004). Las cuencas cubiertas principalmente por materiales gruesos y vegetación natural tiende a contribuir con altas proporciones de agua subsuperficial al caudal (Singh, Pahlow, Booker, Shankar, & Chamorro, 2019b). La parte alta de la cuenca, al tener una alta área de páramos sin degradación que almacenan el agua durante más tiempo, tiene una alta capacidad de regulación como lo comprueba un estudio realizado por Coello, Cisneros, & Feyen (2008).

La microcuenca Piscícola Chirimachay tiene el tipo de vegetación predominado por pasto y algunos parches de bosque, que influye para que la respuesta sea más rápida. Por otra parte, la microcuenca Matadero en Sayausí y Matadero en Puente tienen un bajo aporte de caudal base, indicando que la regulación en estas microcuencas es pobre. Debido a que esta zona tiene grandes proporciones de uso de suelo agrícola y asentamientos humanos, lo que conlleva a un suelo compactado que evita el almacenamiento de agua, por ende, se produce un escurrimiento rápido.

El caudal rápido es mayor en la microcuenca Patoquinoas debido a que predomina el suelo andosol el mismo que al llegar a saturarse por la alta frecuencia de lluvias, reacciona rápidamente ante nuevos eventos de lluvia. Un estudio realizado por De Bièvre, Iñiguez, & Buytaert (2008) afirma que, los ríos descendientes de los páramos por lo general presentan una elevada capacidad de regulación, tal como se constató en la curva de duración de caudales, tienen un flujo base sostenido durante todo el año.

Los gráficos dados por el modelo WETSPRO (Willems, 2009) se presentan a continuación en el Anexo 1.

Índice flujo de inundación

En la Tabla 9 se puede observar que en la parte baja de la zona de estudio presenta mayor susceptibilidad de inundación, ya que en esta parte el índice es mayor en comparación con el resto de microcuencas presentes en la parte alta. Específicamente en Matadero en Puente se encuentra un mayor índice debido a que en esta parte se encuentra mayor cantidad de precipitación que en el resto de cuenca (Condo & Juela, 2017). Por otra parte de acuerdo a Martínez, Coello, & Feyen (2017), indican que al disminuir la capacidad de regulación de la cuenca resulta difícil controlar eventos máximos de precipitaciones, ocasionando inundaciones. Esto se puede explicar debido a que en la parte baja de la cuenca existe un cambio en el uso y cobertura vegetal, por ende baja regulación.

Tabla 9
Índice de flujo de inundación

Estación	FFI
Patoquinoas	0.60
Virgen del Cajas	0.61
Piscícola	0.72
Chirimachay	
Matadero en	1.18
Puente	
Matadero en	1.04
Sayausí	

Fuente: Reyes J (2019)

3.1.2 Análisis por periodos

La definición de los periodos seco y húmedo se realizan en base a un análisis del hidrograma de la microcuenca Matadero en Sayausí (Figura 7). Donde se puede identificar flujos bajos y altos, los cuales corresponden a períodos seco y húmedo, respectivamente. En base a este análisis preliminar y a estudios realizados en la cuenca por Tapia (2016), donde consideran un régimen bimodal con picos de precipitación en los meses mayo y octubre para el periodo húmedo y el período seco corresponde a junio-agosto. Por otro lado Muñoz (2018), define como período húmedo los meses marzo-abril y octubre-noviembre, mientras que el periodo seco agosto-septiembre. Consecuente a esto se delimitó como el período húmedo los meses de marzo-julio y para el periodo seco los meses de agosto-septiembre y noviembre-diciembre.

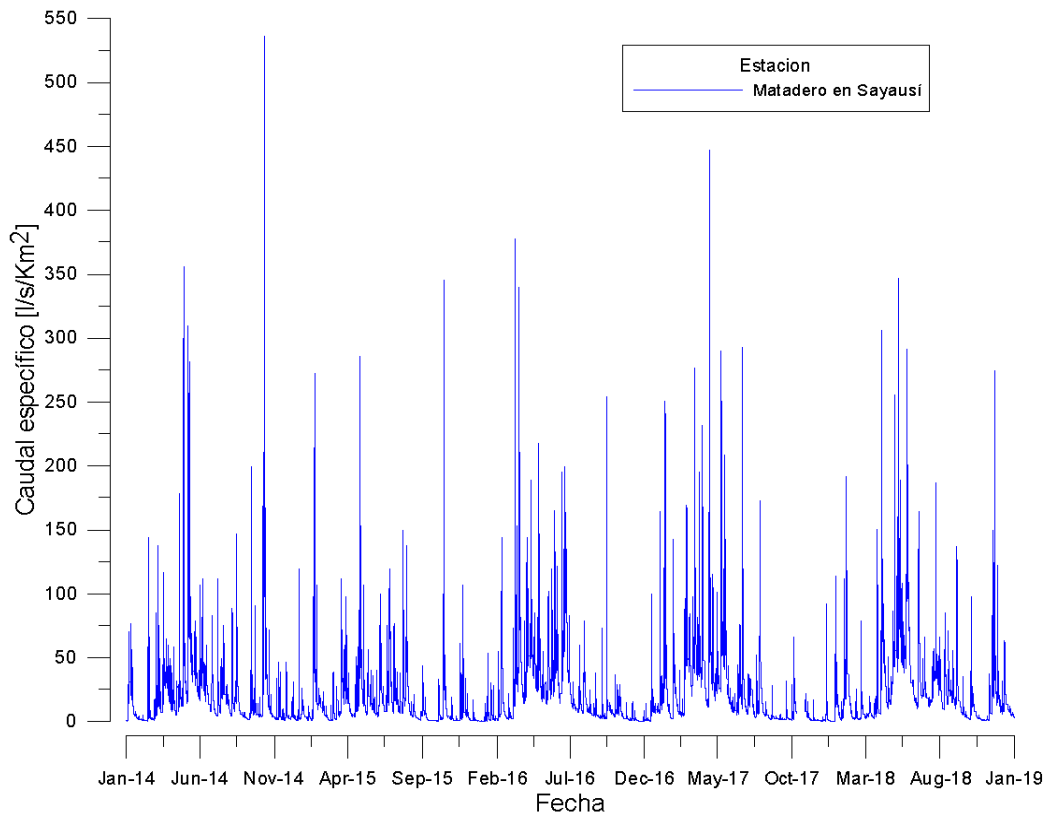


Figura 7: Hidrograma de Matadero en Sayausí.
Fuente: Reyes J (2019).

Análisis hidrológico para periodo húmedo y seco.

Para realizar este análisis, se evaluó el comportamiento para toda la serie de datos por periodos en los que se calcularon los siguientes indicadores: la magnitud de caudales altos y/o bajos, la relación entre ellos y el coeficiente de variación. Estos resultados se presentan en la Tabla 10 y Tabla 11.

Tabla 10
Indicadores para el periodo húmedo.

Indicadores	Patoquinoas	Virgen del Cajas	Piscícola Chirimachay	Matadero en Puente	Matadero en Sayausí
Caudal máximo [l/s/Km ²]	132.00	88.96	230.58	725.58	362.33
Caudal mínimo [l/s/Km ²]	13.26	9.17	6.38	6.24	1.85
Relación caudal máx/mín	9.95	9.70	36.14	116.21	195.73
Coeficiente de variación	0.60	0.53	0.74	1.23	0.98

Fuente: Reyes J (2019)

Los resultados obtenidos en la Tabla 10 correspondiente al periodo húmedo, indican que el valor más alto en los caudales específicos máximos se presentó en la microcuenca Matadero en Puente, seguido de Matadero en Sayausí, Piscícola Chirimachay, Patoquinoas y finalmente Virgen del Cajas. El flujo alto está influenciado por la cantidad de precipitación que se presenta en la cuenca. Por el contrario, el valor más bajo de caudales específicos mínimos se encuentra en la microcuenca Matadero en Sayausí, seguido de Matadero en Puente, Piscícola Chirimachay y Virgen del Cajas. Por último, Patoquinoas, que es 7 veces mayor que la microcuenca que se encuentra en la parte baja de la gradiente correspondiente a Matadero en Sayausí.

Relacionando entre caudales específicos máximos y mínimos de cada microcuenca se puede observar que Virgen del Cajas y Patoquinoas tiene menos variación entre sus caudales, mientras Matadero en Puente y Matadero en Sayausí tienen una alta variación. Adicional a la relación entre máximos y mínimos se calculó el coeficiente de variación. Encontrándose el mismo comportamiento a excepción de Matadero en Puente que muestra mayor variación que Matadero en Sayausí.

Por medio del coeficiente de variación, se puede estimar que la microcuenca Virgen del Cajas y Patoquinoas tienen una mayor capacidad reguladora. Debido a que presentan menos extremos tanto altos como bajos, tal como lo confirman en la curva de duración de caudales. Los resultados concuerdan con un estudio realizado por Martínez et al. (2017) en el que demuestra que las cuencas de páramo poseen los caudales más estables a lo largo del año.

Tabla 11
Indicadores para el periodo seco

Indicadores	Patoquinoas	Virgen del Cajas	Piscícola Chirimachay	Matadero en Puente	Matadero en Sayausí
Caudal máximo [l/s/Km ²]	50.40	43.29	158.37	268.43	189.55
Caudal mínimo [l/s/Km ²]	9.54	5.28	4.58	2.48	0.25
Relación caudal máx/mín	5.28	8.20	34.60	108.26	773.25
Coeficiente de variación	0.40	0.42	0.85	1.21	1.66

Fuente: Reyes J (2019)

En la Tabla 11 se presentan los indicadores para el periodo seco. Donde el valor más alto de caudal máximo es para la microcuenca Puente Matadero, seguido de Matadero

en Sayausí, Piscícola Chirimachay, Patoquinoas y por último Virgen del Cajas. Mientras que un menor caudal específico mínimo se presenta en Matadero en Sayausí, seguido de Matadero en Puente, Piscícola Chirimachay, Virgen del Cajas y Patoquinoas.

En relación al caudal máximo y mínimo se identificaron que la microcuenca Matadero en Sayausí tiene mayor variación entre sus caudales altos y bajos luego de esto lo sigue Matadero en Puente, Piscícola Chirimachay, Virgen del Cajas y Patoquinoas. De igual manera para el coeficiente de variación sigue el mismo comportamiento que la relación.

Comparando entre los dos periodos se determina que para el caudal específico máximo sigue el mismo comportamiento. Encontrándose mayor en la microcuenca Matadero en Puente hasta seis u ocho veces más que Virgen del Cajas en el periodo seco y húmedo, respectivamente. Mientras que para el caudal mínimo el valor más bajo se encuentra en Matadero Sayausí y el valor más alto en Patoquinoas. Por medio de este indicador se puede apreciar que existe mayor regulación cuando se tiene caudales mínimos más altos. En un estudio realizado por (PROMAS, 2011) indica que las microcuencas influenciadas por actividades antrópicas, tienden a presentar caudales mínimos bajos. En cambio, para los caudales máximos altos, se atribuye a que existe mayor precipitación, como es el caso de Matadero en Puente.

La relación entre máximos/mínimos y el coeficiente de variación de Matadero en Sayausí, Patoquinoas y Virgen del Cajas, muestran en el periodo seco tiene mayor variación en sus caudales a comparación en el periodo húmedo. Lo que significa que en este periodo demuestra una mayor capacidad de amortiguación ante eventos extremos, por ende una mayor regulación (Wouter Buytaert et al., 2006). Por último, la microcuenca Piscícola Chirimachay presenta mayor variación en sus caudales en el periodo húmedo, por lo que existe una mayor regulación en sus caudales en el periodo seco.

Análisis de Reactividad

El análisis se realizó por pares de microcuencas que se encuentran en la gradiente altitudinal. A partir de ello se identificaron eventos en los que representen el comportamiento de las microcuencas, evaluando la tendencia de los hidrogramas en el periodo húmedo, por medio de indicadores de reactividad que analizan la sensibilidad que tienen frente a eventos de precipitación: tiempo al pico y tiempo de descenso.

a. Microcuencas Patoquinoas – Virgen del Cajas

En la Figura 8 muestran los hidrogramas de un evento para el periodo húmedo de las microcuencas Patoquinoas y Virgen del Cajas. En el que indica que Virgen del Cajas sigue la tendencia de Patoquinoas, este último siendo mayor con un 32.3%.

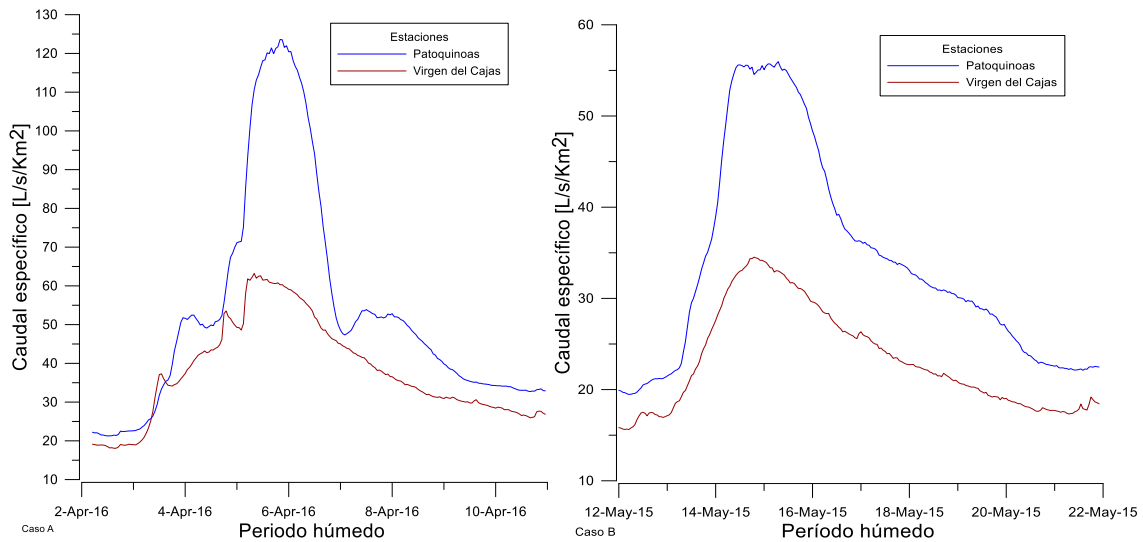


Figura 8: Hidrogramas de las microcuencas Patoquinoas y Virgen del Cajas. Caso A: evento que llegó al pico primero Virgen del Cajas. Caso B: evento que llegó al pico primero Patoquinoas. Fuente: Reyes J (2019)

Ante la respuesta a eventos se aprecia que Patoquinoas reacciona primero y luego de una hora reacciona la microcuenca Virgen del Cajas (Tabla 12). Depende principalmente del estado de saturación que tenga el suelo por lo que se asume que Patoquinoas tiene un mayor grado de saturación, por la presencia de la lagunas que se encuentra en la parte alta de la estación (Bruijnzeel, 2004).

Existe dos casos, como se observa en la Figura 8, el primero corresponde al evento originado desde la parte alta de la cuenca, donde el tiempo estimado para llegar al caudal pico es de 34 horas para la microcuenca Patoquinoas, mientras Virgen del Cajas es 41 horas, por lo que la diferencia entre picos es de nueve horas. El segundo caso, se atribuye cuando Virgen del Cajas llega primero al pico en 23 horas y Patoquinoas llega en 44 horas, indica que los eventos de lluvia se originaron en la parte de la microcuenca Virgen del Cajas. Por otra parte, analizando el tiempo de descenso se encuentra que en ambos casos es mayor en Virgen del Cajas, lo que significa que el agua es evacuada en menor tiempo en la microcuenca Patoquinoas (Tabla 12).

Se encontró tiempos de ascenso y descenso prolongados debido a que el periodo es húmedo, por lo que existe una serie de eventos previos y el evento analizado no es independiente.

La diferencia entre las magnitudes de caudal no se puede atribuir a la cobertura vegetal, debido a que ambas microcuencas están cubiertas en gran parte de páramo, el mismo que es conservado. Sin embargo, en Patoquinoas existe la presencia de lagunas justo aguas arriba de la estación hidrológica que aportan mayor caudal a la cuenca, explicando estas diferencias. Además, esta variación entre eventos depende del estado antecedente de la humedad del suelo, y también de las características de la tormenta (Bruijnzeel, 2004).

Tabla 12

Indicadores de reactividad para Patoquinoas y Virgen del Cajas.

Indicadores	Estación	Caso A	Caso B
Tiempo al pico [horas]	Patoquinoas	44	34
	Virgen del Cajas	23	41
Tiempo descenso [horas]	Patoquinoas	80	106
	Virgen del Cajas	109	108
Tiempo entre picos [horas]		9	8

Fuente: Reyes J (2019)

b. Microcuencas Virgen del Cajas – Piscícola Chirimachay

En la Figura 9 se observa los hidrogramas para un evento en el periodo húmedo, indicando que la microcuenca Piscícola Chirimachay sigue el comportamiento de Virgen del Cajas para caudales bajos. Sin embargo, al llegar a caudales altos Piscícola Chirimachay presenta picos más pronunciados que Virgen del Cajas, se podría explicar debido a que el evento de lluvia se registró aguas debajo de Virgen del Cajas. En el hidrograma se aprecia que reacciona primero ante un evento de precipitación la microcuenca Virgen del Cajas y luego de dos horas Piscícola Chirimachay.

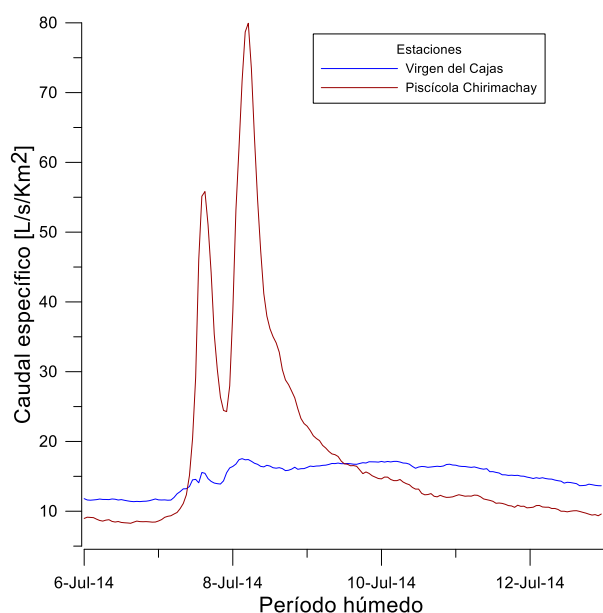


Figura 9: Hidrograma de las microcuencas Virgen del Cajas y Piscícola Chirimachay.
Fuente: Reyes J (2019).

La Tabla 13 se observa que en Piscícola Chirimachay el tiempo estimado en llegar al caudal máximo es menor que Virgen del Cajas, con una diferencia entre picos de una hora. La mayor reactividad presenta la microcuenca Piscícola Chirimachay, esto debido a alteraciones en la cobertura vegetal en el tramo comprendido entre Virgen del Cajas y Piscícola Chirimachay, esta parte es propiedad privada por lo que los usos de tierra son intensivos. Provocando que el agua precipitada se evacue con más rapidez, induciendo mayores picos en menor tiempo. La microcuenca Virgen del Cajas se encuentra al borde del PNC, por lo que casi toda su área se encuentra protegida, mayormente cubierta de páramo, provocando que reaccionen en un tiempo más prolongado, como se indica en el párrafo anterior.

Tabla 13
Indicadores de reactividad para Virgen del Cajas y Piscícola Chirimachay.

Indicadores	Estación	Promedio
Tiempo al pico [horas]	Virgen del Cajas	20
	Piscícola Chirimachay	13
Tiempo descenso [horas]	Virgen del Cajas	111
	Piscícola Chirimachay	111
Diferencia entre picos [hora]		1

Fuente: Reyes J (2019).

c. Microcuencas Piscícola Chirimachay – Matadero en Puente

Comparando las dos microcuencas en los hidrogramas del periodo húmedo se puede observar que Piscícola Chirimachay sigue la tendencia de Matadero en Puente, siendo este último mayor con 32.7%. Este valor alto puede ser justificado por la gran cantidad de precipitación que se encuentra en esta parte media de la cuenca (Tapia, 2016). En la Figura 10 se aprecia que la microcuenca Matadero en Puente tiene mayor fluctuación en el caudal comparado con Piscícola Chirimachay. Ante un evento de precipitación reacciona primero la microcuenca que se encuentra en la parte alta de la cuenca luego de una hora reacciona Matadero en Puente.

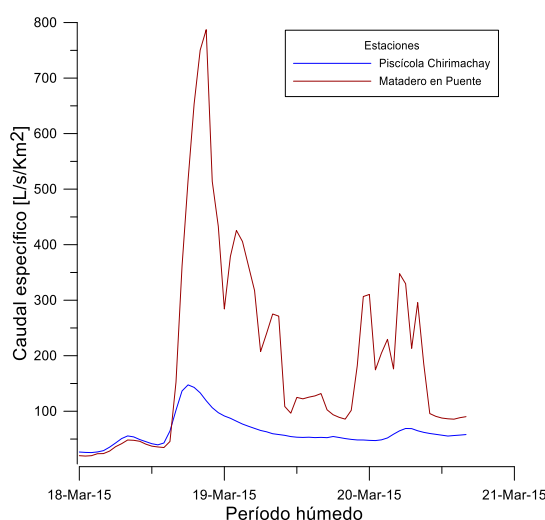


Figura 10: Hidrograma de las microcuencas Piscícola Chirimachay y Matadero en Puente.
Fuente: Reyes J (2019)

En la Tabla 14 se observó que la microcuenca Matadero en Puente tarda siete horas en llegar al caudal máximo, a diferencia de Piscícola Chirimachay con ocho horas, siendo el tiempo entre picos de una hora. Para el tiempo de descenso tienen el mismo comportamiento en las dos microcuencas.

Tabla 14

Indicadores de reactividad para las microcuencas Piscícola Chirimachay y Matadero Puente.

Indicadores	Estación	Promedio
Tiempo al pico [horas]	Piscícola Chirimachay	8
	Matadero en Puente	7
Tiempo descenso [horas]	Piscícola Chirimachay	22
	Matadero en Puente	20
Diferencia entre picos [horas]		1

Fuente: Reyes J (2019)

d. Microcuencas Matadero en Puente – Matadero en Sayausí

De acuerdo a los hidrogramas para el periodo húmedo se pudo identificar que Matadero en Sayausí sigue la tendencia de Matadero en Puente, este es menor con un 7%. En la Figura 11 se identifica que empieza a aumentar Matadero en Puente y luego de una hora reacciona Matadero en Sayausí. Presentando picos más pronunciados ante un evento de precipitación Matadero en Puente.

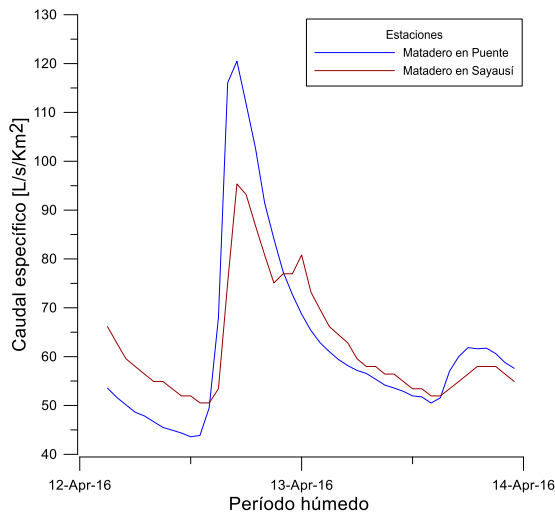


Figura 11: Hidrograma de las microcuencas Matadero en Puente y Matadero en Sayausí.
Fuente: Reyes J (2019).

Los resultados en la Tabla 15 indican que Matadero en Puente tiene un tiempo al pico mayor que Matadero en Sayausí, con una diferencia entre picos de tres horas, el tiempo de evacuación del agua es aproximadamente un día para las dos microcuencas. Por lo tanto, Matadero en Sayausí reacciona más rápido a los eventos de precipitación, debido a que esta parte de la cuenca tiene mayor compactación en la capa superior del suelo, por actividades antrópicas, contribuyendo a reducir gradualmente la posibilidad de infiltración de lluvia, lo que hace que se evacue mucho más rápido (Bruijnzeel, 2004).

Tabla 15

Indicadores de reactividad para las microcuencas Matadero en Puente y Matadero en Sayausí.

Indicadores	Estación	Promedio
Tiempo al pico [hora]	Matadero en Puente	7
	Matadero en Sayausí	4
Tiempo descenso [horas]	Matadero en Puente	35
	Matadero en Sayausí	38
Diferencia entre picos [hora]		2

Fuente: Reyes J (2019).

3.4 Análisis de eventos extremos

Los eventos seleccionados corresponden a: evento 1 de 18 horas (11 de octubre de 2014); evento 2 de 22 horas (23 de julio de 2015); evento 3 de 28 horas (20 de noviembre de 2018) y evento 4 de 30 horas (25 de mayo de 2018). Para ello se calcularon los siguientes indicadores de reactividad, los cuales se encuentran en el Anexo 3: el inicio y fin del evento [fecha/ hora], el tiempo al pico [horas], el tiempo de descenso [horas] y las tasas medias de ascenso y descenso cuyos resultados se presentan a continuación.

En la Figura 12 se observa los hidrogramas correspondientes al evento 1, donde se puede identificar que responde primero al evento de precipitación Virgen del Cajas. Después de dos horas responde Matadero en Sayausí, Piscícola Chirimachay lo hace en tres horas, Matadero Puente después de cuatro horas de iniciado el evento en la cuenca, por último, responde la microcuenca Patoquinoas dentro de seis horas. La respuesta a eventos de precipitación está dominada por la saturación de los suelos, por lo que la microcuenca Patoquinoas tarda en responder por la presencia de lagunas que se tienen que saturarse el 100% y luego reaccionar.

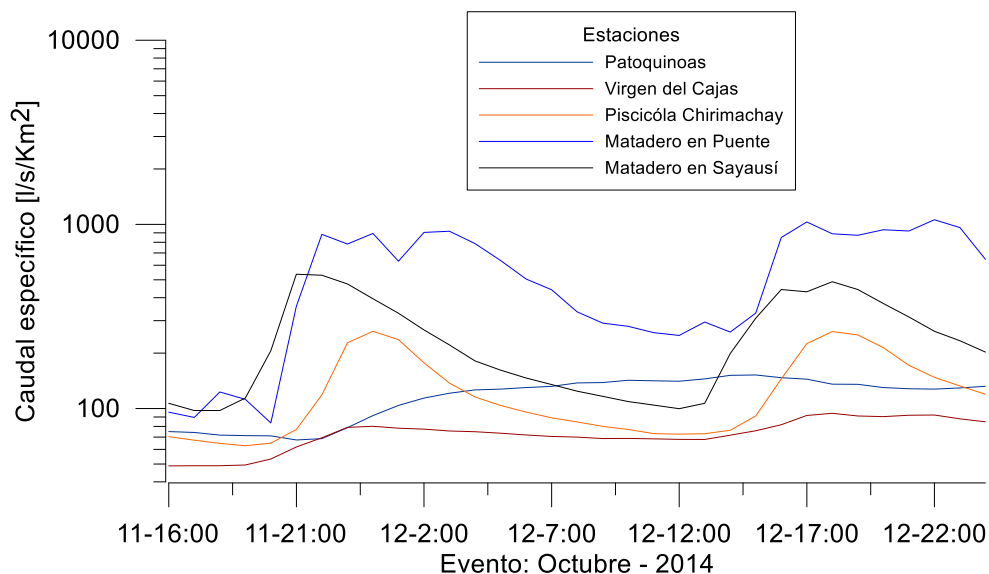


Figura 12: Evento 1 correspondiente a octubre de 2014.
Fuente: Reyes J (2019).

En los eventos 2 y 3 las microcuencas: Virgen del Cajas, Piscícola Chirimachay y Dos Chorreras (evento 2) reaccionan primero ante los eventos de precipitación, luego de una hora responde Matadero en Puente y seguido Matadero Sayausí en dos horas para el evento 2 y en una hora el evento 3. Por último, reacciona la microcuenca Patoquinoas, tal como se explicó en el anterior evento presenta el mismo comportamiento. Esto se

encuentra en los hidrogramas de la Figura 13 y Figura 14 para los eventos 2 y 3, respectivamente.

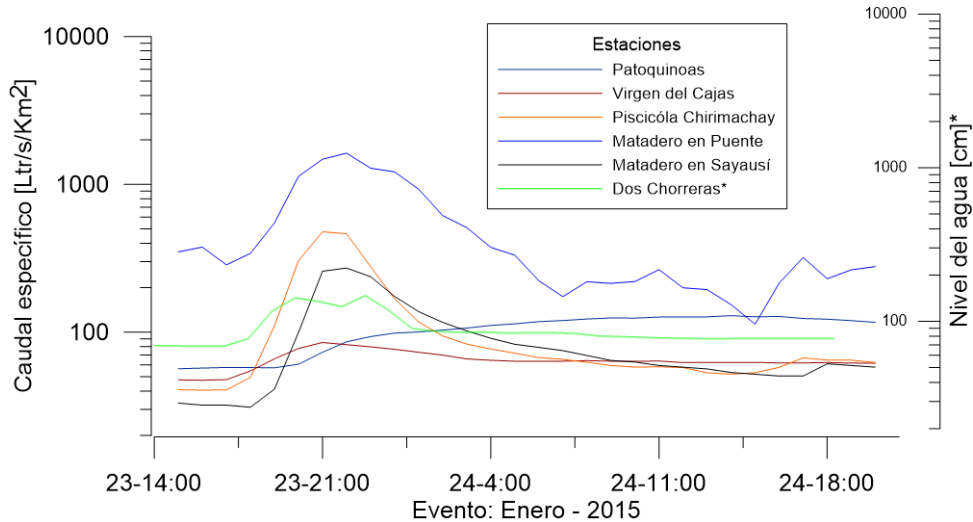


Figura 13: Evento 2 correspondiente a enero de 2015
Fuente: Reyes J (2019).

En la Figura 12 y Figura 13 se puede observar que Matadero en Puente presenta mayor caudal específico incluso mayor que Matadero en Sayausí, en parte puede explicarse por la presencia de captaciones de agua que se encuentran a lo largo del gradiente altitudinal, ubicadas antes de la estación de Matadero en Sayausí.

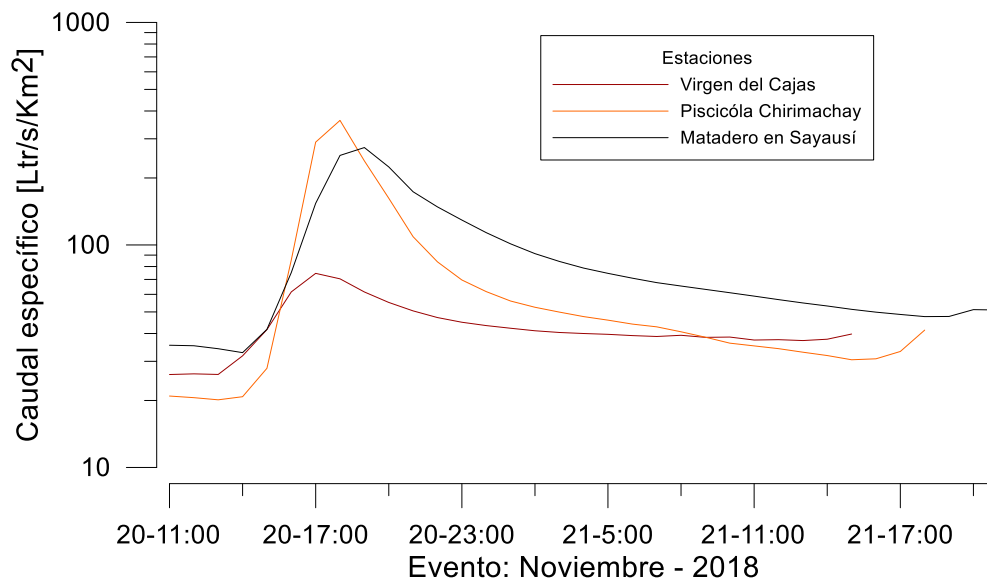


Figura 14: Evento 3 correspondiente a noviembre de 2018.
Fuente: Reyes J (2019)

El evento 4, tiene un comportamiento diferente debido que le preceden varios eventos en la parte baja de la cuenca, específicamente en Matadero en Sayausí y Piscícola Chirimachay, estas reaccionan a la misma hora y luego de cuatro horas empieza a aumentar Virgen del Cajas y Patoquinoas (Figura 15).

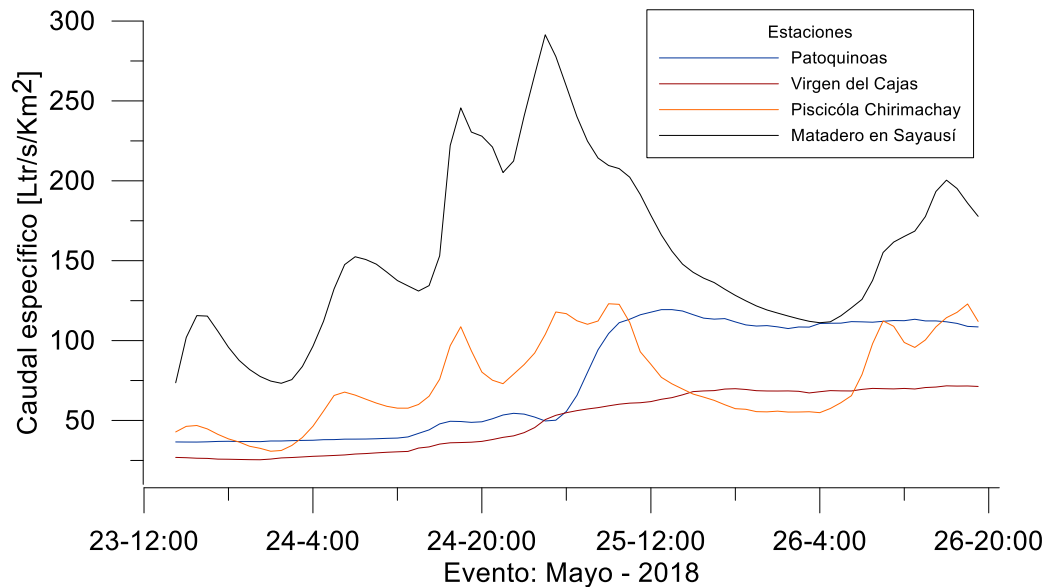


Figura 15: Evento 4 correspondiente a mayo 2018.
Fuente: Reyes J (2019).

Existe una tendencia marcada en el tiempo al pico en los eventos 1, 2 y 4 donde la microcuenca Matadero en Sayausí tarda en promedio cuatro horas en llegar al caudal específico máximo, siendo menor que el resto de microcuencas. Por otra parte, Piscícola Chirimachay y Virgen del Cajas llegan al pico en cinco horas, seguido de Matadero en Puente (seis horas) y Patoquinoas (18 horas). Para el evento 3 Virgen del Cajas llega primero al pico en cuatro horas, luego de 5 horas Piscícola Chirimachay y Matadero en Sayausí. Los eventos que se dan en un periodo seco (evento 1) le antecede un periodo de bajo caudal provocando una respuesta de escorrentía rápida (tres horas). Mientras los eventos durante los periodos de lluvia de larga duración provocan un pico retrasado (evento 4), que llegan al pico en cuatro horas (Pal, Tularug, Jana, & Pal, 2018).

Esta tendencia cambia para el tiempo de descenso donde Patoquinoas tarda en promedio un día que termine el evento de precipitación, seguido de Piscícola Chirimachay y Matadero en Puente que retiene el agua cerca de 19 horas; mientras Matadero en Sayausí y Virgen del Cajas tardan alrededor de 17 horas. La duración mínima de eventos es de 14 horas correspondiente a la microcuenca Matadero en Puente (evento 2). Por el contrario la duración máxima de eventos corresponde a la

microcuenca Patoquinoas con dos días, este comportamiento se puede explicar por la presencia de lagunas que actúan como reservorio, puesto que éstas aportan agua al río además de la presencia de precipitaciones, provocando que los eventos duren más tiempo.

En la microcuenca Matadero en Sayausí tiene tiempos al pico menores durante todos los eventos analizados, mientras que en la microcuenca Patoquinoas el tiempo al pico y de descenso es mayor, esto se debe a la alta regulación que tiene el páramo. Piscícola Chirimachay, Matadero en Puente y Matadero en Sayausí, los efectos del cambio de uso de suelo han perjudicado la capacidad de retención del agua una de las características fundamentales del páramo. Debido a que en la mayoría de precipitación que se dan a lo largo de la gradiente, el volumen de agua que sale lo hace en tiempos menores, desencadenando inundaciones o sequías que no se pueden presentar en una cuenca inalterada, como es el caso de Patoquinoas y Virgen del Cajas (Mansfield, 2015).

En las tasas media de ascenso, presentaron resultados mayores en la microcuenca Matadero en Sayausí y Matadero en Puente, mientras que en Patoquinoas se encuentra un valor menor. Por otro lado, analizando la tasa media de descenso señala que las microcuencas Matadero en Puente y Matadero en Sayausí tienen mayores valores. Lo que indican la pérdida de regulación de estas microcuencas, puesto que en posibles crecidas, la rápida velocidad de aumento puede causar desbordamientos y el rápido descenso del caudal en los hidrogramas podría causar sequías de mayor duración.

Los resultados indican que la microcuenca Matadero en Sayausí reacciona más rápido a eventos extremos, esto debido a que las afecciones que tiene el suelo por el cambio en su uso y cobertura hacen que el agua precipitada escurra más rápidamente provocando mayores picos de una manera más rápida. Sin embargo, la microcuenca Virgen del Cajas es la que reacciona primero pues esta mantiene flujos de agua constantes, los mismos que al presentarse un evento de lluvia aumentan más rápido.

Por otra parte, analizando el último indicador que corresponde a la relación que tiene entre el caudal específico máximo y el mínimo. La microcuenca Patoquinoas tiene un menor valor, lo que indicó un menor rango de caudales, mientras las dos microcuencas Matadero en Puente y Piscícola Chirimachay presentaron rangos mayores. Esto muestra la baja regulación de estas microcuencas con cobertura afectada debido a que es más propenso de presentar caudales extremadamente bajos y altos.



De los eventos de precipitación intensa, se encontró que una vez iniciado el evento en las microcuencas Virgen del Cajas y Piscícola Chirimachay, tarda de dos a tres horas en reaccionar en Matadero en Sayausí. Sin embargo, existen crecidas que no se presentan en la parte alta de la cuenca como es el caso del evento 4, por lo que se atribuye que la tormenta se originó desde la parte baja de la cuenca de estudio. Justificando esta variación a lo largo de la gradiente depende de las características de la tormenta (Bruijnzeel, 2004).

En los eventos analizados, la lluvia estuvo ubicada en la parte de Piscícola Chirimachay y Matadero en Puente, en los hidrogramas se puede observar que responde a todos los eventos (Piscícola Chirimachay), siendo la estación más útil para el pronóstico de caudales.

En general en la Figura 12, Figura 13, Figura 10, Tabla 10, Tabla 11 se pudo identificar que Matadero en Puente presenta valores más altos que el resto de microcuencas, justificándose por estudios tales como: Tapia (2016), Condo & Juela (2017) y Muñoz (2018) en el que afirman que existe mayor precipitación en la parte media de la zona de estudio. Como se puede observar en Figura 16 los volúmenes medios de precipitación son menores en la parte alta y baja de la cuenca mientras que en la parte media se encuentran los valores más altos.

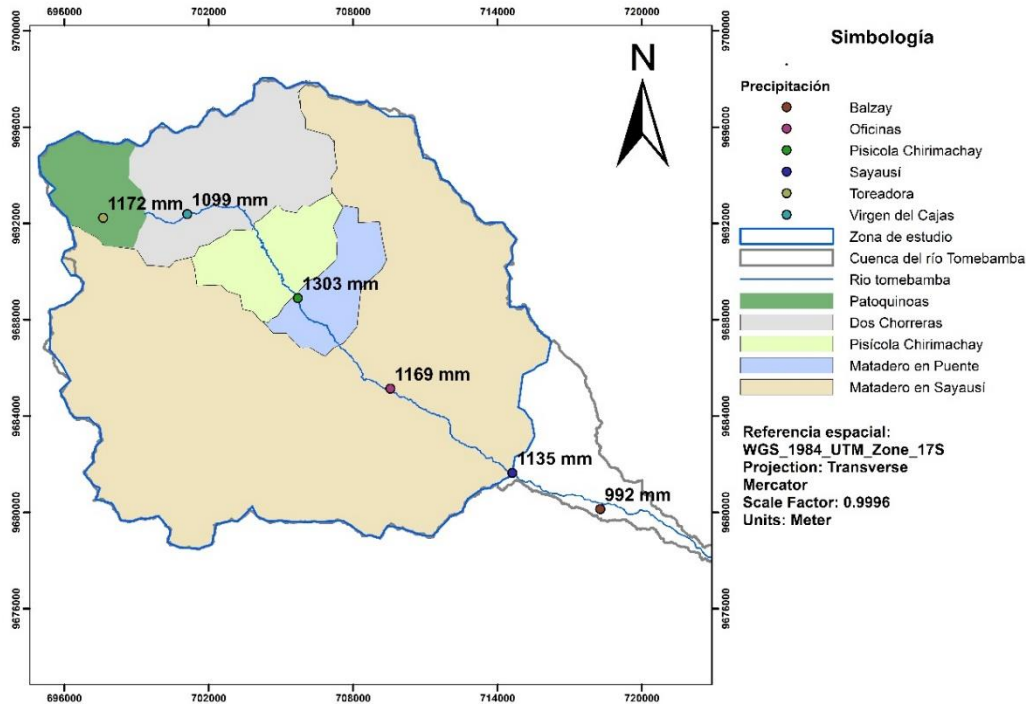


Figura 16: Distribución de la precipitación a lo largo del gradiente altitudinal.
Fuente: Modificación propia de (Tapia, 2016).

4. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

De las 5 estaciones hidrológicas y sus respectivas microcuencas analizadas a lo largo de la gradiente altitudinal, Virgen del Cajas y Patoquinoas son las que presentan los mejores índices de regulación en comparación con el resto de microcuencas. Esto se explica debido a que mantienen intacta la cobertura vegetal y por ende las características del suelo. Particularmente la microcuenca Patoquinoas presenta caudales específicos superiores al resto debido a la precipitación registrada en el páramo y a la presencia de lagunas que, al actuar como reservorios naturales, mantienen un flujo de agua constante, encontrado un caudal más alto en períodos secos. Conocer esto fue posible ya que estas estaciones se ubican en un área protegida, el Parque Nacional Cajas. Por el contrario, en Piscícola Chirimachay, Matadero en Puente y Matadero en Sayausi (salida de la cuenca) disminuye la capacidad de regulación conforme aumenta el área de estudio, puesto que estas zonas al estar intervenidas provocan una disminución en la capacidad reguladora.

Analizando el comportamiento hidrológico de la cuenca se determinó que el caudal base en las microcuencas Patoquinoas y Virgen del Cajas representa el 62 % del flujo total

disponible. En esta parte influye el suelo ya que demuestra una mayor capacidad de retención y dispone del flujo a lo largo del año, incluso en épocas secas. En la parte media y baja de la cuenca de estudio existe una disminución paulatina de la capacidad de regulación, encontrándose en Matadero en Puente y Matadero en Sayausí tienen el 46% y 49%, respectivamente del flujo total disponible. El tiempo tomado para llegar a su condición de caudal base es de 18 días para Patoquinoas y seis días para Matadero en Sayausí. Por lo que en la parte baja de la zona de estudio refleja la influencia de las actividades antrópicas en la capacidad de almacenamiento del agua.

Se encontró que la microcuenca Matadero en Puente presenta mayor variabilidad (coeficiente de variación) en sus caudales, seguido de Matadero en Sayausí, Piscícola Chirimachay, Patoquinoas y Virgen del Cajas para el periodo húmedo y en el periodo seco conforme aumenta el área de las microcuencas aumenta la variación de sus caudales. Encontrándose valores más altos y bajos de caudal específico en Matadero en Sayausí. Por lo que se determinó que la magnitud del flujo varía entre cuencas hidrográficas dependiendo de topografía, suelos y lluvia.

La duración de eventos que causaron el desbordamiento del río varía entre 14 a 48 horas, encontrándose que en la parte baja de la cuenca tienden a durar menos, es decir reaccionan más rápido que el resto de microcuencas a eventos de precipitación intensa. Sin embargo, la microcuenca que reacciona primero a eventos de precipitación es Virgen del Cajas puesto que ésta cuenta con flujos constantes de agua y al presentarse un evento este empieza a aumentar, además de tener menos área de suelo que humedecer y saturar con la lluvia antes de escurrir. En este contexto, se puede afirmar que la respuesta hidrológica está dominada por las propiedades físicas del suelo.

Se encontró también que una vez iniciado un evento extremo en la parte alta de la cuenca del Tomebamba (específicamente en las microcuencas Virgen del Cajas y Piscícola Chirimachay), tarda de dos a tres horas en reaccionar en la parte baja de la zona de estudio (Matadero en Sayausí). Por lo que conocer el tiempo aproximado en el que las ondas de inundación tardan en propagarse es muy importante para las instituciones para generar sistemas de alerta temprana, permitiendo reducir los distintos riesgos asociados a estos eventos.

Dentro de los eventos analizados muestra que aguas abajo pueden existir crecidas fuertes que no son presentadas en la parte alta de la cuenca, por lo que los eventos de inundación depende mucho de las características de las tormentas. Sin embargo, se

apreció que la microcuenca Piscícola Chirimachay siempre reacciona y sigue el comportamiento de los hidrogramas de Matadero en Puente y Sayausí. Por ello esta estación es muy importante como sistema de alerta temprana ya que responde a todos los eventos analizados.

En general se recomienda que es de suma importancia mantener los páramos conservados, pues como se observó las microcuencas Patoquinoas y Virgen del Cajas aunque con ciertas diferencias, conservan las características naturales como es la regulación hídrica y la reactividad baja. Mientras en Matadero en Sayausí y Matadero en Puente, se puede evidenciar el impacto que provocan cambios en las propiedades hidrológicas del suelo, como las tasas de infiltración del suelo, lo cual contribuye potencialmente a una menor capacidad de regulación hídrica y siendo más susceptibles a las inundaciones.

4.1 Investigaciones futuras

Es importante seguir monitoreando estas microcuencas con la finalidad de información histórica. Esto permitirá profundizar en la variabilidad temporal multianual, ya que esta investigación se estudió con datos desde el año 2014.

También se deberían instrumentar todas las microcuencas que conforman el Tomebamba. Esto es, las microcuencas del Llaviucu, Mazan y Culebrillas, para conocer si estas microcuencas tienen comportamientos similares o diferentes y cuáles generan más peligros en casos de inundación y cuáles sostienen mejor los caudales de verano, importantes para el sistema de agua potable de Cuenca.

Estos estudios permitirán obtener conclusiones determinantes que permitan un mejor manejo de las cuencas hidrográficas y conocer la tendencia del comportamiento espacio temporal de caudales.

5. REFERENCIAS

- Abebe, A., & Forch, G. (2014). Catchment characteristics as predictors of base flow index (BFI) in Wabi-shebele river basin , East Africa Tropentag 2006 University of Bonn , October 11-13 , 2006 Conference on International Agricultural Research for Development (BFI) IN WABI SHEBELE, (May).
- Ahmed, K., Shahid, S., & Nawaz, N. (2018). Impacts of climate variability and change on seasonal drought characteristics of Pakistan. *Atmospheric Research*, 214, 364–

374. <https://doi.org/10.1016/j.atmosres.2018.08.020>

- Beck, H. E., van Dijk, A. I. J. M., Miralles, D. G., de Jeu, R. A. M., Sampurno Bruijnzeel, L. A., McVicar, T. R., & Schellekens, J. (2013). Global patterns in base flow index and recession based on streamflow observations from 3394 catchments. *Water Resources Research*, 49(12), 7843–7863. <https://doi.org/10.1002/2013WR013918>
- Belesaca, K., & Peláez, K. (2018). *Análisis del rendimiento hídrico en cuencas de alta montaña en los Andes Ecuatorianos*.
- Berghuijs, W. R., Woods, R. A., Hutton, C. J., & Sivapalan, M. (2016). Dominant flood generating mechanisms across the United States. *Geophysical Research Letters*, 43(9), 4382–4390. <https://doi.org/10.1002/2016GL068070>
- Bruijnzeel, L. A. (2004). Hydrological functions of tropical forests: Not seeing the soil for the trees? In *Agriculture, Ecosystems and Environment* (Vol. 104, pp. 185–228). <https://doi.org/10.1016/j.agee.2004.01.015>
- Burbano, B. (2015). *Análisis de caudales y precipitaciones de los ríos Tomebamba y Yanuncay*. Universidad del Azuay. Retrieved from <http://dspace.uazuay.edu.ec/bitstream/datos/5208/1/11590.pdf>
- Buytaert, W., Iñiguez, V., Celleri, R., & De Bievre, B. (2006). Ecology of snow tussocks in the mountain grasslands of New Zealand. *Vegetatio*. <https://doi.org/10.1007/BF00332843>
- Buytaert, Wouter, Céleri, R., De Bièvre, B., Cisneros, F., Wyseure, G., Deckers, J., & Hofstede, R. (2006). Human impact on the hydrology of the Andean páramos. *Earth-Science Reviews*, 79(1–2), 53–72. <https://doi.org/10.1016/j.earscirev.2006.06.002>
- Buytaert, Wouter, Cuesta-Camacho, F., & Tobon, C. (2011). Potential impacts of climate change on the environmental services of humid tropical alpine regions. *Global Ecology and Biogeography*, 20, 19–33. <https://doi.org/10.1111/j.1466-8238.2010.00585.x>
- Buytaert, Wouter, & De Bièvre, B. (2012). Water for cities: The impact of climate change and demographic growth in the tropical Andes. *Water Resources Research*, 48(8).
- Carrillo-Rojas, G., Silva, B., Córdova, M., Céleri, R., & Bendix, J. (2016). Dynamic mapping of evapotranspiration using an energy balance-based model over an

- andean páramo catchment of southern ecuador. *Remote Sensing*, 8(2).
<https://doi.org/10.3390/rs8020160>
- Céleri Alvear, R., De Bièvre, B., & Iñiguez, V. (2004). *EFFECTOS DE LA COBERTURA VEGETAL EN LA REGULACIÓN HIDROLÓGICA DE MICROCUENCAS DE PÁRAMO*.
- Celleri, R., Willems, P., Buytaert, W., & Feyen, J. (2007). Space–time rainfall variability in the Paute Basin, Ecuadorian Andes. *Hydrological Processes*, 21(August), 3316–3327. <https://doi.org/10.1002/hyp>
- Chapman, T. (1999). A comparison of algorithms for stream flow recession and base flow separation Abstract :, 714(January 1998), 701–714.
- Cisneros, F., Coello, C., Crespo, P., Bievre, B., & Feyen, J. (2007). Análisis de curvas de duración general para determinar el grado de degradación de cuencas hidrográficas. *Anales de Ingeniería*, 935, 38.
- Cisneros, Felipe, Sáenz, M., Coello, C., & Pacheco, E. (2014). Evaluación de herramientas de modelización para la toma de decisiones en la revitalización hidrológica & forestal en cuencas de montaña. In *7th International Perspective on Water Resources and the Environment*. <https://doi.org/10.13140/2.1.2463.9049>
- Clausen, B. (1997). Relationships between benthic biota and hydrological indices in New Zealand streams, 327–342.
- Clausen, B., & Biggs, B. J. F. (2000). Flow variables for ecological studies in temperate streams : groupings based on covariance, 237, 184–197.
- Coello, C., Cisneros, F., & Feyen, J. (2008). Efecto de la Cobertura Vegetal en la Respuesta Hidrológica de Cuencas Hidrográficas.
- Condo, A., & Juela, M. (2017). *Análisis Del Comportamiento Hidrológico Y Estado Actual Del Recurso Hídrico En Las Cuencas Del Río Tomebamba Y Yanuncay Durante El Año 2015*.
- Córdova, M., Céleri, R., Shellito, C. J., Orellana-Alvear, J., Abril, A., & Carrillo-Rojas, G. (2016). Near-Surface Air Temperature Lapse Rate Over Complex Terrain in the Southern Ecuadorian Andes: Implications for Temperature Mapping. *Arctic, Antarctic, and Alpine Research*, 48(4), 673–684.
<https://doi.org/10.1657/AAAR0015-077>



- Crespo, A., & Pinos, N. (2007). Determinación del Rango de Variación del Índice de Vegetación con Imágenes Satelitales en Parque Nacional Cajas. *Dspace.Uazuay.Edu.Ec*, 90. Retrieved from <http://dspace.uazuay.edu.ec/bitstream/datos/3281/1/10055.pdf>
- Crespo, P., Celleri, R., Buytaert, W., Feyen, J., Iñiguez, V., Borja, P., & De Bievre, B. (2009). *Land use change impacts on the hydrology of wet Andean páramo ecosystems*. Retrieved from [http://dspace.ucuenca.edu.ec/jspui/bitstream/123456789/22092/1/scopus 135.pdf](http://dspace.ucuenca.edu.ec/jspui/bitstream/123456789/22092/1/scopus%20135.pdf)
- Crespo, P., Feyen, J., Buytaert, W., Bücken, A., Breuer, L., Frede, H. G., & Ramírez, M. (2011). Identifying controls of the rainfall-runoff response of small catchments in the tropical Andes (Ecuador). *Journal of Hydrology*, 407(1–4), 164–174. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2011.07.021>
- Crespo, P. J., Feyen, J., Buytaert, W., Bücken, A., Breuer, L., Frede, H. G., & Ramírez, M. (2011). Identifying controls of the rainfall-runoff response of small catchments in the tropical Andes (Ecuador). *Journal of Hydrology*, 407(1–4), 164–174. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2011.07.021>
- Daza, M. C., Hernández, F., & Triana, F. A. (2014). Efecto del Uso del Suelo en la Capacidad de Almacenamiento Hídrico en el Páramo de Sumapaz - Colombia. *Revista Facultad Nacional de Agronomía Medellín*, 67(1), 7189–7200. <https://doi.org/10.15446/rfnam.v67n1.42642>
- De Bièvre, B., Iñiguez, V., & Buytaert, W. (2008). Hidrología del páramo. *Investigaciones Biofísicas En El Páramo*, 1–15.
- Hofstede, R., Segarra, P., & Mena, P. (2003). Los Páramos del Mundo.
- Jacobs, S. R., Timbe, E., Weeser, B., Rufino, M. C., Butterbach-Bahl, K., & Breuer, L. (2018). Land use alters dominant water sources and flow paths in tropical montane catchments in East Africa, (February), 1–32. <https://doi.org/10.5194/hess-2018-61>
- Keating, P. L. (1998). Effects of anthropogenic disturbances on paramo vegetation in podocarpus national park, Ecuador. *Physical Geography*, 19(3), 221–238. <https://doi.org/10.1080/02723646.1998.10642648>
- Lazo, P. X., Mosquera, G. M., McDonnell, J. J., & Crespo, P. (2019). The role of vegetation, soils, and precipitation on water storage and hydrological services in

- Andean Páramo catchments. *Journal of Hydrology*, 572, 805–819.
<https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2019.03.050>
- Llambí, L., Soto, A., Celleri, R., De Bievre, B., Ochoa, B., & Borja, P. (2012). *Ecología, hidrología y suelos de páramos. Proyecto Páramo Andino*.
- Llanos, H., Garfias, J., & Bâ Mamadou, K. (2002). Análisis de métodos para la estimación de caudales máximos de avenidas: aplicación a cinco cuencas vergentes de la provincia de Álava (País Vasco). *Estudios Del Museo de Ciencias Naturales de Álava*, (17), 51–82.
- Lott, D. A., & Stewart, M. T. (2016). Base flow separation: A comparison of analytical and mass balance methods. *Journal of Hydrology*, 535, 525–533.
<https://doi.org/10.1016/J.JHYDROL.2016.01.063>
- Mansfield, D. (2015). SYNOPTIC METEOROLOGY | Forecasting A2 - North, Gerald R. In J. Pyle & F. B. T.-E. of A. S. (Second E. Zhang (Eds.) (pp. 280–288). Oxford: Academic Press. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/B978-0-12-382225-3.00399-6>
- Martínez, E., Coello, C., & Feyen, J. (2017). Análisis comparativo del comportamiento de la escorrentía de tres microcuencas andinas con diferente régimen de precipitación y cobertura vegetal. *MASKANA*, 8(1).
<https://doi.org/10.18537/mskn.08.01.12>
- Mosquera, G., Céleri, R., Lazo, P. X., Vaché, K. B., Perakis, S. S., & Crespo, P. (2016). Combined use of isotopic and hydrometric data to conceptualize ecohydrological processes in a high-elevation tropical ecosystem. *Hydrological Processes*, 30(17), 2930–2947. <https://doi.org/10.1002/hyp.10927>
- Muñoz, P. (2018). Flash-flood forecast modelling in a mountain catchment based on the Random Forest algorithm. *INTERUNIVERSITY PROGRAMME MASTER OF SCIENCE IN WATER RESOURCES ENGINEERING*, (September).
- Muñoz, P., Céleri, R., & Feyen, J. (2016). Effect of the resolution of tipping-bucket rain gauge and calculation method on rainfall intensities in an andean mountain gradient. *Water (Switzerland)*, 8(11). <https://doi.org/10.3390/w8110534>
- Naranjo, D. (2018). *Elaboración de hidrogramas de crecidas de las cuencas de los ríos Tomebamba, Tarqui y Yanuncay desde el año 1997 - 2017*. Universidad del Azuay.



- Retrieved from <http://dspace.uazuay.edu.ec/bitstream/datos/8304/1/14027.pdf>
- Ochoa, B. (2014). Regionalisation of hydrological indices to assess land - use change impacts in the Tropical Andes, 1.
- Olden, J. D., & Poff, N. L. (2003). REDUNDANCY AND THE CHOICE OF HYDROLOGIC INDICES FOR CHARACTERIZING STREAMFLOW REGIMES, 121(January), 101–121. <https://doi.org/10.1002/rra.700>
- Otaya, Leodán; Vásquez, G. B. G. de J. (2008). ESTIMACIÓN DE LA OFERTA HÍDRICA CON INFORMACIÓN ESCASA EN ECOSISTEMAS ESTRATÉGICOS. Retrieved from <http://www.scielo.org.co/pdf/rfnam/v61n1/a13v61n1.pdf>
- Pal, I., Tularug, P., Jana, S. K., & Pal, D. K. (2018). Risk assessment and reduction measures in landslide and flash flood-prone areas: A case of Southern Thailand (Nakhon Si Thammarat Province). In *Integrating Disaster Science and Management: Global Case Studies in Mitigation and Recovery* (pp. 295–308). Elsevier Inc. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-812056-9.00017-8>
- Pesántez, J. (2015). *Propuesta de modelo de gestión de la subcuenca del río Tomebamba, como herramienta de manejo integrado y conservación*. Universidad del Azuay . Retrieved from <http://dspace.uazuay.edu.ec/bitstream/datos/4576/1/11063.pdf>
- Pesántez, J., Mosquera, G., Crespo, P., Breuer, L., & Windhorst, D. (2018). Effect of land cover and hydro-meteorological controls on soil water DOC concentrations in a high-elevation tropical environment. *Hydrological Processes*, 32(17), 2624–2635. <https://doi.org/10.1002/hyp.13224>
- Rodas, M. (2018). *Análisis de la regulación hidrológica de lagunas en una zona de páramo del Austro Ecuatoriano*. UNIVERSIDAD DE CUENCA. Retrieved from <http://dspace.ucuenca.edu.ec/bitstream/123456789/31068/1/Trabajo de Titulación.pdf.pdf>
- Rosburg, T. (2015). *Flow duration curves and sediment yield estimation for urbanizing watersheds*. Retrieved from https://mountainscholar.org/bitstream/handle/10217/167136/Rosburg_colostate_0053N_13107.pdf?sequence=1
- Segarra, J. (2007). *IMPACTO DEL CAMBIO DEL USO DE SUELO SOBRE LA*



- CALIDAD DEL AGUA DEL RIO TOMBAMBA. *Diplomado Superior En Educación Universitaria Por Competencias*. <https://doi.org/10.1016/j.medengphy.2004.12.016>
- Shakti, P., Shrestha, N., & Gurung, P. (2010). Step wise Multi-criteria Performance Evaluation of Rainfall-Runoff Models using WETSPRO. *Journal of Hydrology and Meteorology*, 7(1), 18–29. <https://doi.org/10.3126/jhm.v7i1.5613>
- Singh, S. K., Pahlow, M., Booker, D. J., Shankar, U., & Chamorro, A. (2019a). Towards base flow index characterisation at national scale in New Zealand. *Journal of Hydrology*, 568(November 2018), 646–657. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2018.11.025>
- Singh, S. K., Pahlow, M., Booker, D. J., Shankar, U., & Chamorro, A. (2019b). Towards baseflow index characterisation at national scale in New Zealand. *Journal of Hydrology*, 568, 646–657. <https://doi.org/10.1016/J.JHYDROL.2018.11.025>
- Sklenář, P., & Jørgensen, P. M. (1999). Distribution patterns of paramo plants in Ecuador. *Journal of Biogeography*, 26(4), 681–691. <https://doi.org/10.1046/j.1365-2699.1999.00324.x>
- Subramanya, K. (2008). *Engineering hydrology*. Tata McGraw-Hill.
- Tapia, J. D. (2016). *ESTRUCTURA DE LA PRECIPITACIÓN Y SU VARIABILIDAD ESPACIO-TEMPORAL A LO LARGO DE*. Universidad de Cuenca.
- Urrutia, R., & Vuille, M. (2009). Climate change projections for the tropical Andes using a regional climate model : Temperature and precipitation simulations for the end of the 21st century, 114, 1–15. <https://doi.org/10.1029/2008JD011021>
- Willems, P. (2004). A time series tool to support the multi-criteria performance evaluation of rainfall-runoff models. *Environmental Modelling and Software*, 24(3), 311–321. <https://doi.org/10.1016/j.envsoft.2008.09.005>
- Willems, P. (2009). A time series tool to support the multi-criteria performance evaluation of rainfall-runoff models. *Environmental Modelling and Software*, 24(3), 311–321. <https://doi.org/10.1016/j.envsoft.2008.09.005>
- Yadav, M., & Wagener, T. (2007). Regionalization of constraints on expected watershed response behavior for improved predictions in ungauged basins, 30, 1756–1774. <https://doi.org/10.1016/j.advwatres.2007.01.005>

6. ANEXOS

Anexo 1: Graficas de separación de flujo

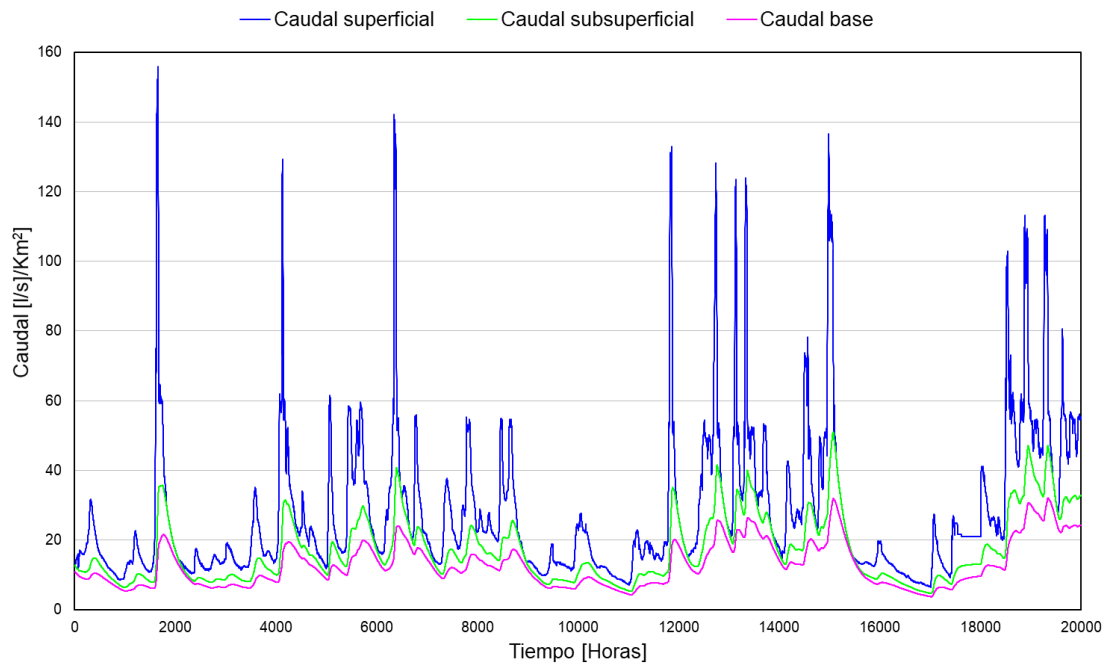


Figura 17: Separación de flujo de la microcuenca Patoquinoas

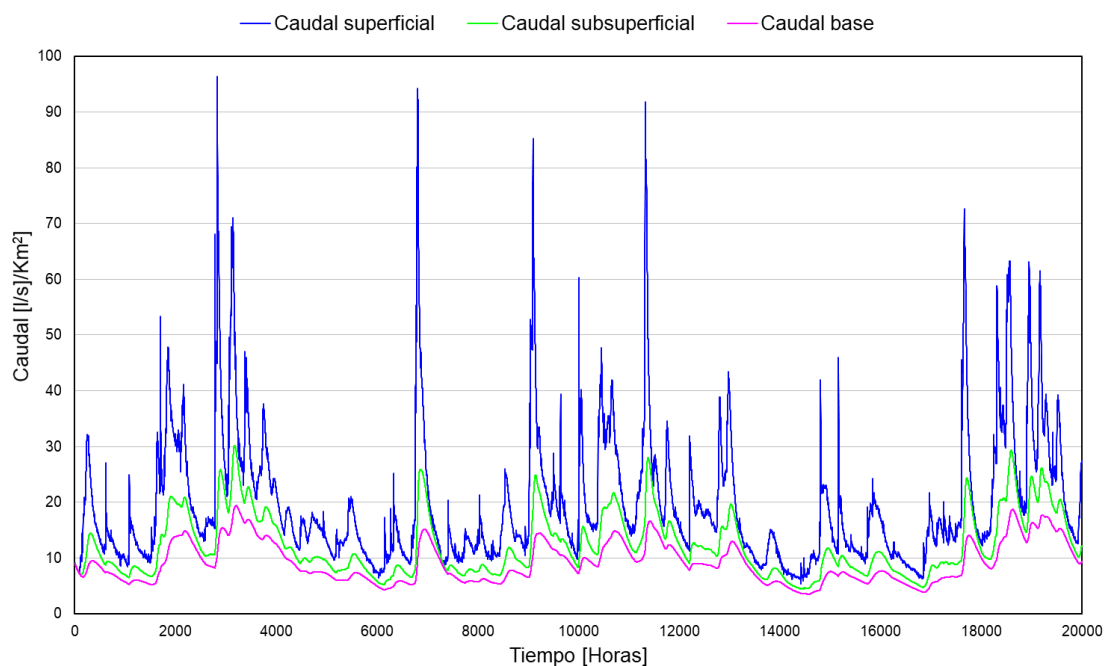


Figura 18: Separación de flujo de la microcuenca Virgen del Cajas

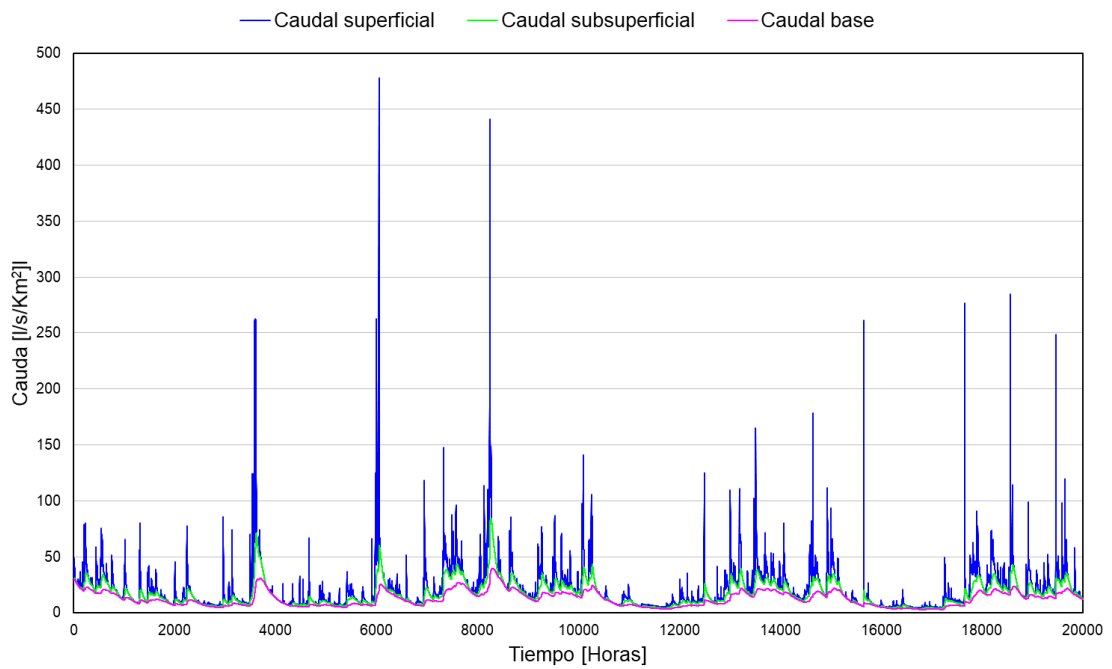


Figura 19: Separación de flujo de la microcuenca Piscícola Chirimachay

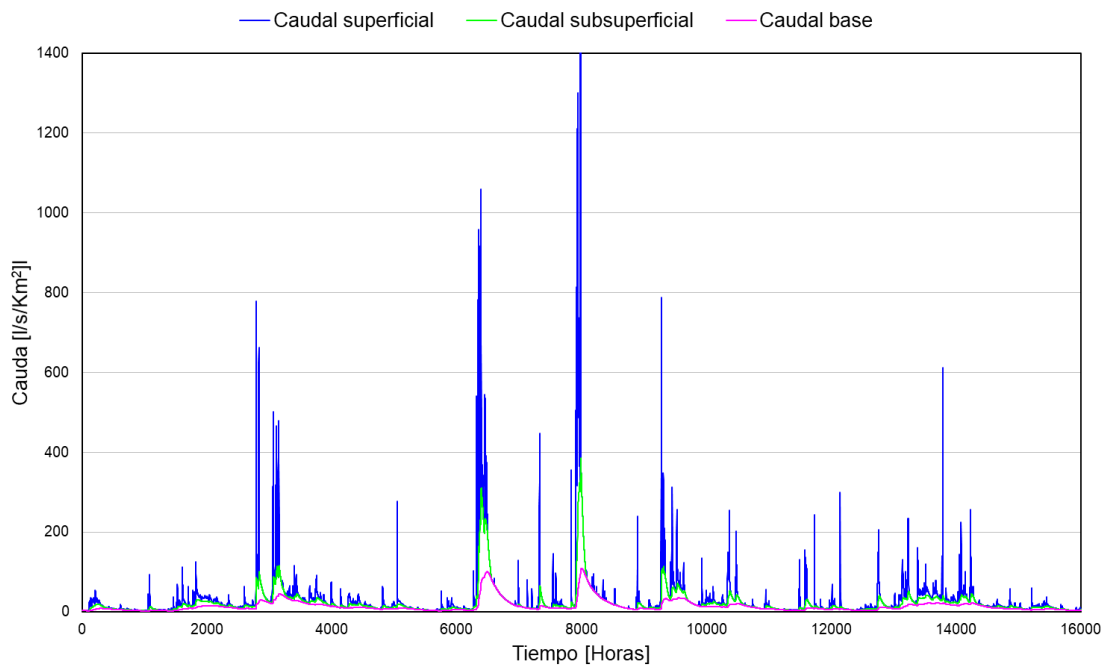


Figura 20: Separación de flujo de la microcuenca Matadero en Puente

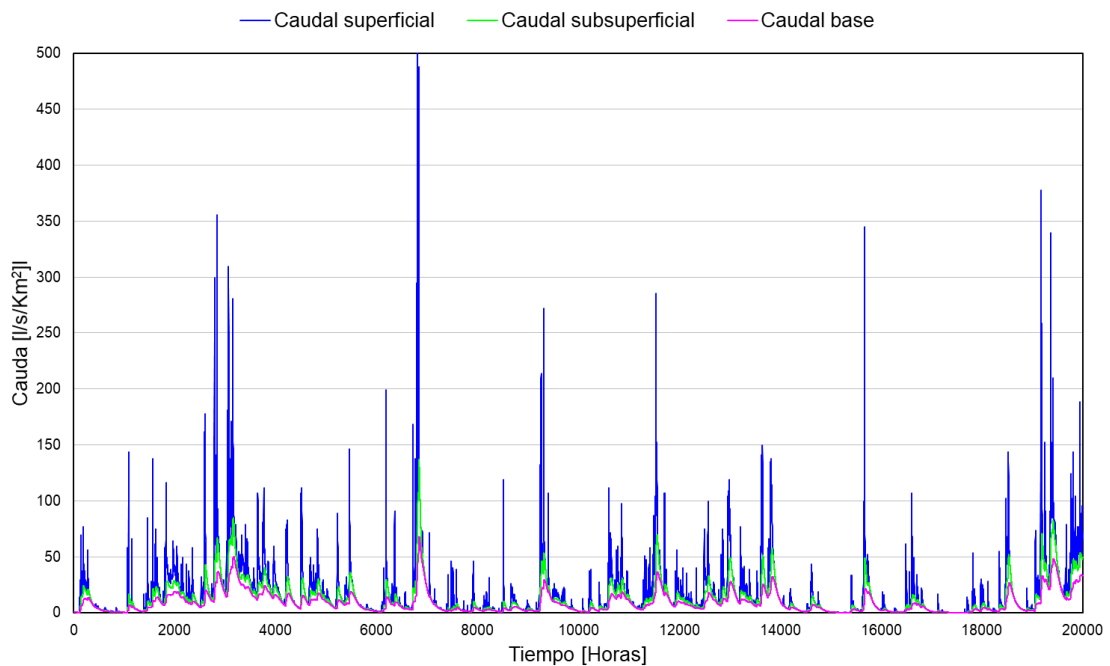


Figura 21: Separación de flujo de la microcuenca Matadero en Sayausí

Anexo 2: Hidrogramas correspondiente al periodo húmedo

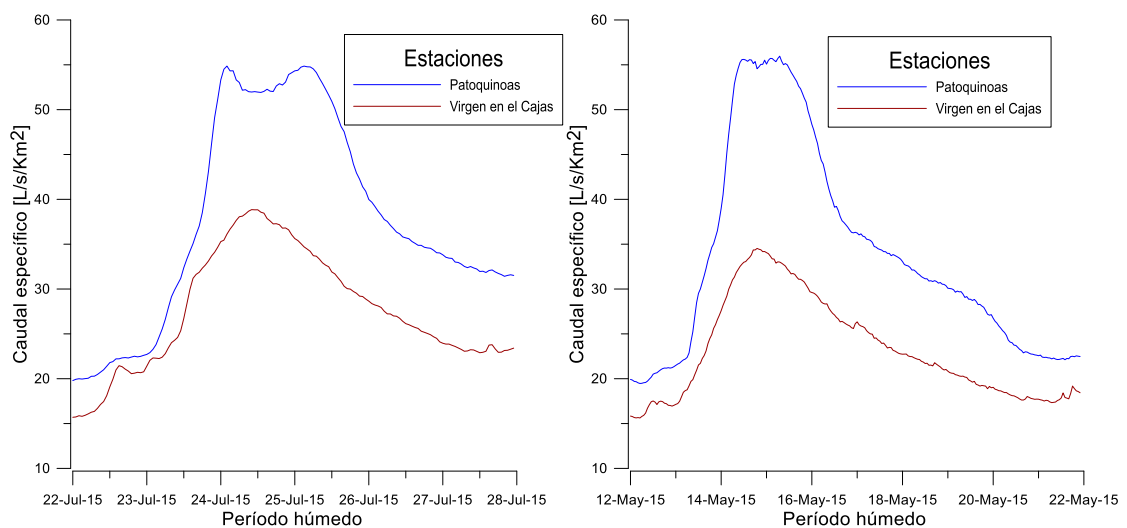


Figura 22: Hidrogramas de la microcuenca Patoquinoas y Virgen del Cajas, señalando eventos que llegaron al pico primero Patoquinoas.

Fuente: Reyes J (2019).

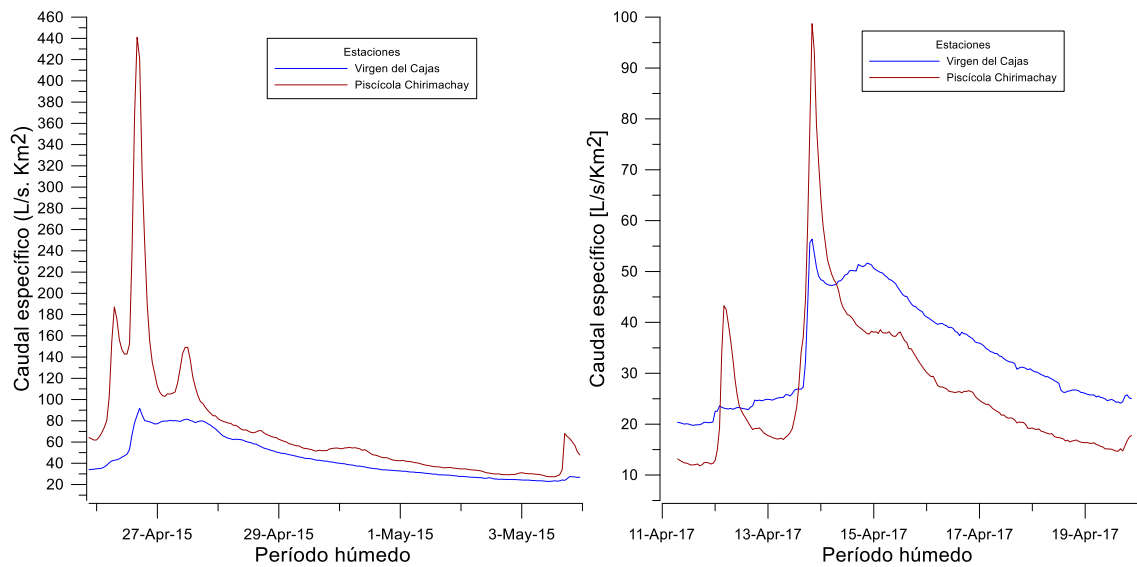


Figura 23: Hidrogramas de las microcuencas Virgen del Cajas y Piscícola Chirimachay.
Fuente: Reyes J (2019).

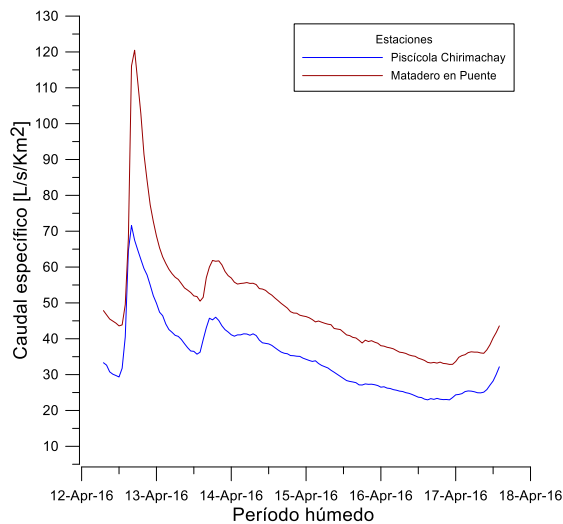


Figura 24: Hidrogramas de las microcuencas Piscícola Chirimachay y Matadero en Puente.
Fuente: Reyes J (2019).

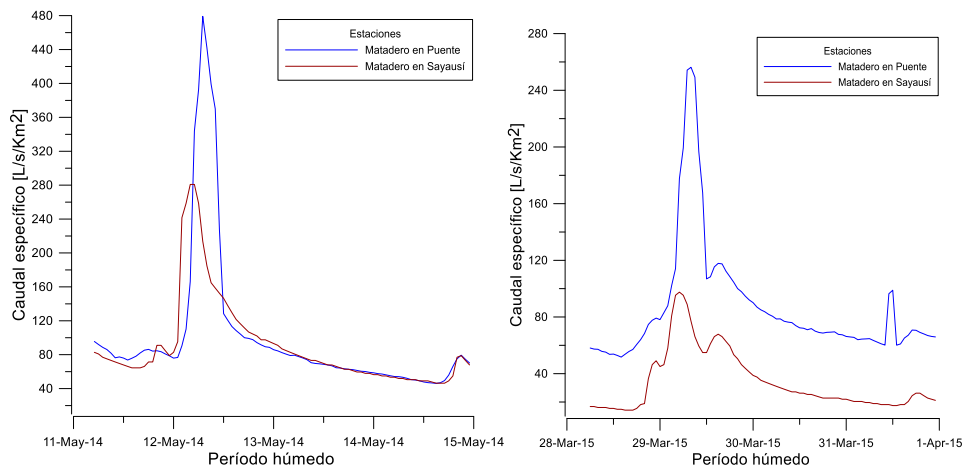


Figura 25: Hidrogramas de la microcuenca Matadero en Puente y Matadero en Sayausí.
Fuente: Reyes J (2019).

Anexo 3: Tabla de indicadores de reactividad y la regulación hídrica para los eventos de inundación.

Tabla 16
Indicadores de reactividad

Indicadores	Estaciones	Evento 1	Estaciones	Evento 2
Inicio [fecha]	Patoquinoas	11/10/2014 22:00	Patoquinoas	23/01/2015 19:00
	Virgen del Cajas	11/10/2014 16:00	Virgen del Cajas	23/01/2015 16:00
	Piscícola	11/10/2014 19:00	Piscícola	23/01/2015 16:00
	Chirimachay	11/10/2014 20:00	Chirimachay	23/01/2015 17:00
	Matadero en Puente	11/10/2014 18:00	Matadero en Puente	23/01/2015 18:00
	Matadero en Sayausí		Matadero en Sayausí	23/01/2015 16:00
Fin [fecha]	Patoquinoas	12/10/2014 22:00	Patoquinoas	25/01/2015 16:00
	Virgen del Cajas	12/10/2014 13:00	Virgen del Cajas	24/01/2015 16:00
	Piscícola	12/10/2014 12:00	Piscícola	24/01/2015 14:00
	Chirimachay	12/10/2014 12:00	Chirimachay	24/01/2015 7:00
	Matadero en Puente	12/10/2014 12:00	Matadero en Puente	24/01/2015 16:00
	Matadero en Sayausí	12/10/2014 12:00	Matadero en Sayausí	24/01/2015 6:00
Tiempo al pico [horas]	Patoquinoas	17	Patoquinoas	19
	Virgen del Cajas	8	Virgen del Cajas	5
	Piscícola	5	Piscícola	5
	Chirimachay	7	Chirimachay	5
	Matadero en Puente	3	Matadero en Puente	4
	Matadero en Sayausí		Matadero en Sayausí	



			Dos Chorreras	7
Tiempo descenso [horas]	Patoquinoas	7	Patoquinoas	26
	Virgen del Cajas	13	Virgen del Cajas	19
	Piscícola	12	Piscícola	17
	Chirimachay		Chirimachay	
	Matadero en Puente	9	Matadero en Puente	9
	Matadero en Sayausí	15	Matadero en Sayausí	18
			Dos Chorreras	7
Tiempo del evento [horas]	Patoquinoas	24	Patoquinoas	45
	Virgen del Cajas	21	Virgen del Cajas	24
	Piscícola	17	Piscícola	22
	Chirimachay		Chirimachay	
	Matadero en Puente	16	Matadero en Puente	14
	Matadero en Sayausí	18	Matadero en Sayausí	22
			Dos Chorreras	14
Tasa mediana ascenso [l/s/Km2/h]	Patoquinoas	11.1	Patoquinoas	3.5
	Virgen del Cajas	4.5	Virgen del Cajas	8.3
	Piscícola	43.7	Piscícola	86.9
	Chirimachay		Chirimachay	
	Matadero en Puente	94.3	Matadero en Puente	305.8
	Matadero en Sayausí	140.9	Matadero en Sayausí	69.8
Tasa mediana descenso [l/s/Km2/h]	Patoquinoas	-3.7	Patoquinoas	-3.4
	Virgen del Cajas	-9.7	Virgen del Cajas	-1.1
	Piscícola	-14.3	Piscícola	-18.9
	Chirimachay		Chirimachay	
	Matadero en Puente	-74.2	Matadero en Puente	-72.6
	Matadero en Sayausí	-30.8	Matadero en Sayausí	-9.5
Caudal máximo	Patoquinoas	152.22	Patoquinoas	129.39
	Virgen del Cajas	80.12	Virgen del Cajas	85.20
	Piscícola	262.96	Piscícola	477.77
	Chirimachay		Chirimachay	
	Matadero en Puente	917.68	Matadero en Puente	1626.92
	Matadero en Sayausí	536.54	Matadero en Sayausí	271.77
Caudal mínimo	Patoquinoas	68.67	Patoquinoas	54.78
	Virgen del Cajas	48.81	Virgen del Cajas	47.33
	Piscícola	62.81	Piscícola	40.55
	Chirimachay		Chirimachay	
	Matadero en Puente	83.61	Matadero en Puente	113.33
	Matadero en Sayausí	97.56	Matadero en Sayausí	31.07
Caudal máx/Caudal mín	Patoquinoas	2.21	Patoquinoas	2.36
	Virgen del Cajas	1.64	Virgen del Cajas	1.8
	Piscícola	4.18	Piscícola	11.78
	Chirimachay		Chirimachay	
	Matadero en Puente	10.97	Matadero en Puente	14.35
	Matadero en Sayausí	5.49	Matadero en Sayausí	8.74



Indicadores	Estaciones	Evento 3	Estaciones	Evento 4
Inicio [fecha]	Virgen del Cajas	20/11/2018 13:00	Patoquinoas	25/05/2018 2:00
	Piscícola	20/11/2018 13:00	Virgen del Cajas	24/05/2018 23:00
	Chirimachay	20/11/2018 14:00	Piscícola	24/05/2018 22:00
	Matadero en Sayausí		Chirimachay	24/05/2018 22:00
			Matadero en Sayausí	24/05/2018 22:00
Fin [fecha]	Virgen del Cajas	21/11/2018 13:00	Patoquinoas	27/05/2018 1:00
	Piscícola	21/11/2018 15:00	Virgen del Cajas	26/05/2018 7:00
	Chirimachay	21/11/2018 18:00	Piscícola	26/05/2018 1:00
	Matadero en Sayausí		Chirimachay	26/05/2018 4:00
			Matadero en Sayausí	26/05/2018 4:00
Tiempo al pico [horas]	Virgen del Cajas	4	Patoquinoas	12
	Piscícola	5	Virgen del Cajas	11
	Chirimachay	5	Piscícola	10
	Matadero en Sayausí		Chirimachay	4
			Matadero en Sayausí	
Tiempo descenso [horas]	Virgen del Cajas	20	Patoquinoas	35
	Piscícola	21	Virgen del Cajas	15
	Chirimachay	23	Piscícola	20
	Matadero en Sayausí		Chirimachay	26
			Matadero en Sayausí	26
Tiempo del evento [horas]	Virgen del Cajas	24	Patoquinoas	47
	Piscícola	26	Virgen del Cajas	26
	Chirimachay	28	Piscícola	30
	Matadero en Sayausí		Chirimachay	30
			Matadero en Sayausí	
Tasa media ascenso [l/s/Km2/h]	Virgen del Cajas	12.65	Patoquinoas	2.78
	Piscícola	73.62	Virgen del Cajas	1.29
	Chirimachay	54.77	Piscícola	2.82
	Matadero en Sayausí		Chirimachay	10.17
			Matadero en Sayausí	
Tasa media descenso [l/s/Km2/h]	Virgen del Cajas	-1.47	Patoquinoas	-2.249
	Piscícola	-8.81	Virgen del Cajas	-0.1
	Chirimachay	-6.88	Piscícola	-3.89
	Matadero en Sayausí		Chirimachay	-6.6
			Matadero en Sayausí	
Caudal máximo	Virgen del Cajas	74.55	Patoquinoas	119.92
	Piscícola	362.67	Virgen del Cajas	71.72
	Chirimachay	274	Piscícola	142.87
	Matadero en Sayausí		Chirimachay	291.4
			Matadero en Sayausí	
Caudal mínimo	Virgen del Cajas	26.1	Patoquinoas	23.37
	Piscícola	20.13	Virgen del Cajas	16.9
	Chirimachay			



Universidad de Cuenca

	Matadero en Sayausí	32.8	Piscícola	9.84
			Chirimachay	
			Matadero en Sayausí	27.6
	Virgen del Cajas	2.84	Patoquinoas	5.2
Caudal	Piscícola	18.01	Virgen del Cajas	5.2
máx/Cauda	Chirimachay			
I mín	Matadero en Sayausí	8.35	Piscícola	14.5
			Chirimachay	
			Matadero en Sayausí	10.6

Fuente: Reyes J (2019)